

# MICROUSINAGEM: AULA 9

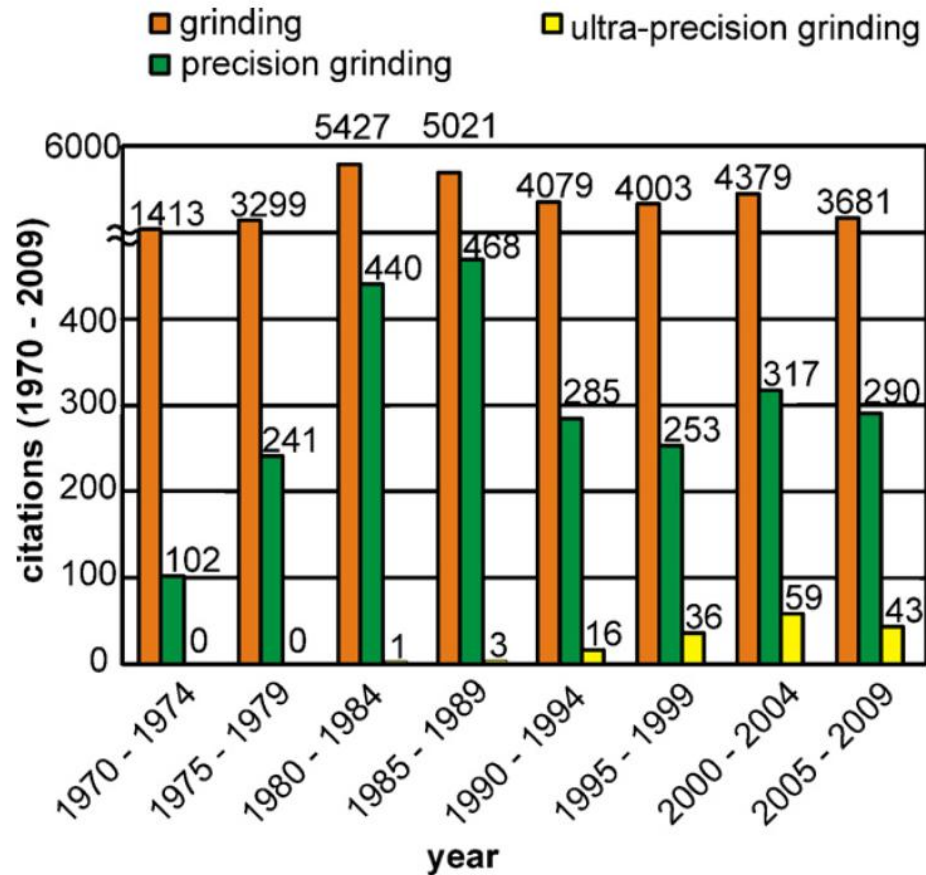
## Retificação de Ultraprecisão e Microretificação

**Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues**  
**Prof. Assoc. Renato Goulart Jazinevicius**

## SUMÁRIO

Introdução  
Definições  
Processo de Retificação de Materiais Frágeis  
Ferramentas e Máquinas  
Mecanismos de remoção de material  
Aplicações

# Introdução



**Fig. 1.** Number of publications (Literature search with online-database FIZ-DOMA/-WEMA).

## Introdução

Quando se pensa em retificação de ultraprecisão e/ou microretificação, se pensa em usinagem de qual tipo de material?

Mas Por Que?

# Introdução

Materiais tipicamente frágeis geralmente são não-Metálicos ou então uma liga como os CERMETs.

Mas os Materiais não-Metálicos são usináveis?

Quais processos?

Quão bem? (acabamento, tolerâncias, etc.)

Para quais aplicações?

## Introdução

### Quais são os Materiais não Metálicos?

Monocristais	Policristalinos	Amorfos	Compósitos
Ge, Si, GaAs, InSb, GaP Quartzo Safira, etc.	Si, ZnS, etc.	PMMA, PC, Nylon, PVC, etc.	Epoxy/CNT Compósitos com fibra de carbono, etc.
	Cerâmicos: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , WC, TiN, TiAl, TiCN, Si <sub>4</sub> N <sub>3</sub> , SiC, etc.	BK7, Vidros ópticos Borosilicatos, etc.	

## Processos *versus* Materiais Não Metálicos

Processo	Cristais	Policristais	Amorfos	Cerâmica	Compósitos
Torneamento/ fresamento			(*)	?	
Retificação					
Lapidação/ Polimento					
Processos físico/químicos			(**)		(**)

(\*) Vidros

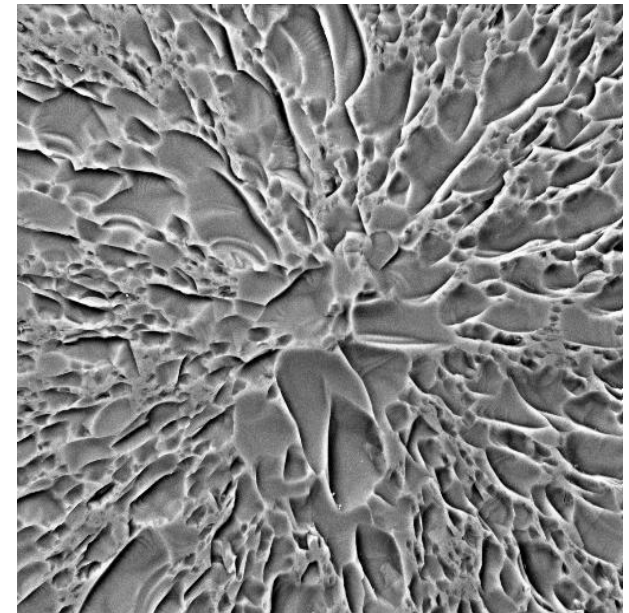
(\*\*) Polímeros

## Introdução

A aplicação de processos convencionais de usinagem não são apropriadas às propriedades dos materiais frágeis.

### Exemplo

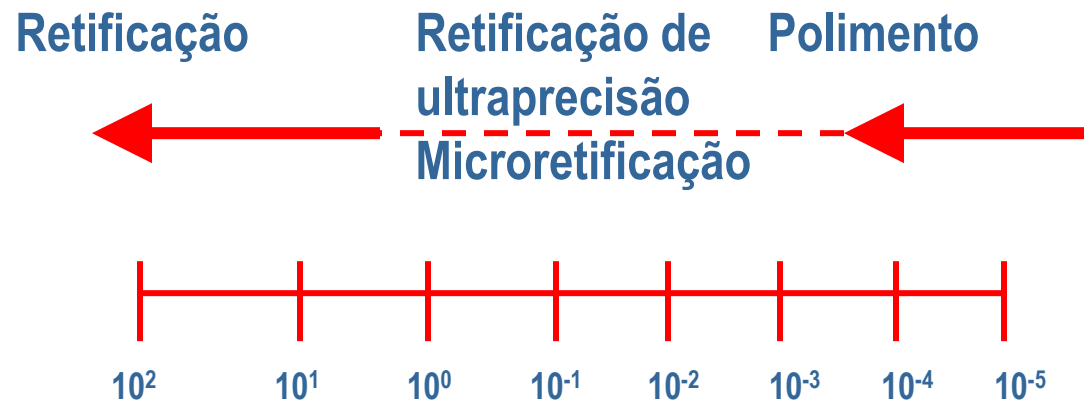
Material	Si (100)
Processo	Torneamento de face
Ferramenta	Diamante
Avanço $f$	$12 \mu\text{m}/\text{rev}$
Profundidade de usinagem $a_p$	$10 \mu\text{m}$
Rotação (rpm)	1000





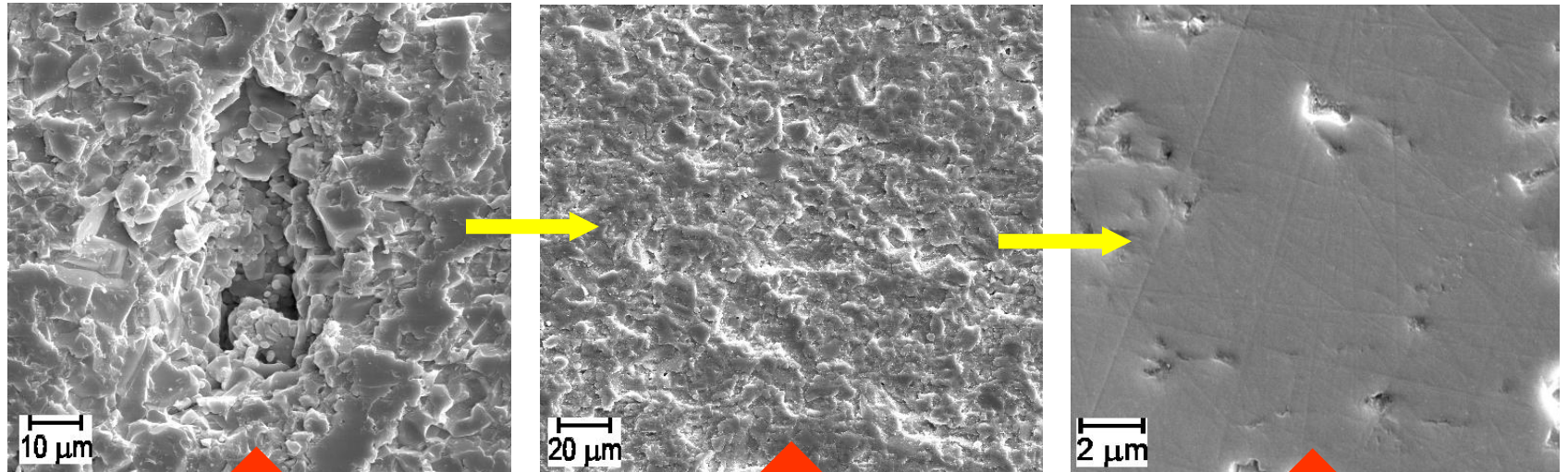
# Introdução

## Processos e Dimensão de corte



**Taxa de remoção de material  
( $\text{mm}^3/\text{seg}$ )**

## Processos e Dimensão de corte



Após Retificação

Após Lapidação

Após Polimento

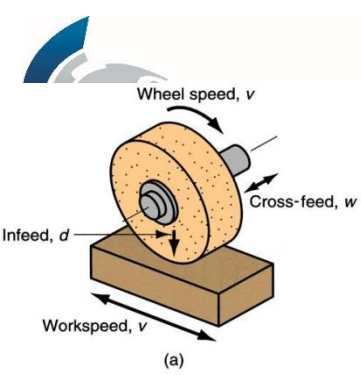
Retificação

Lapidação

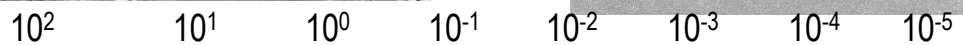
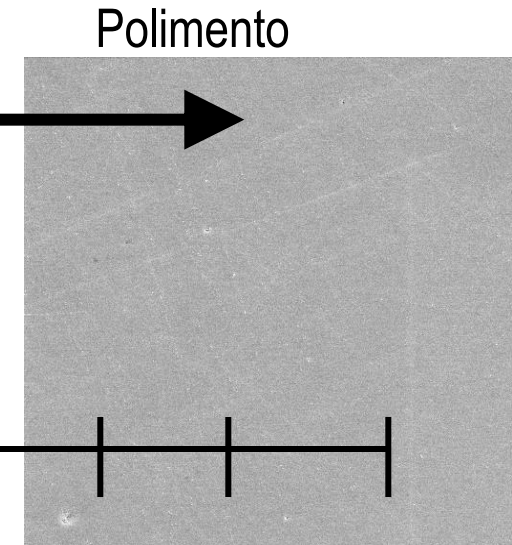
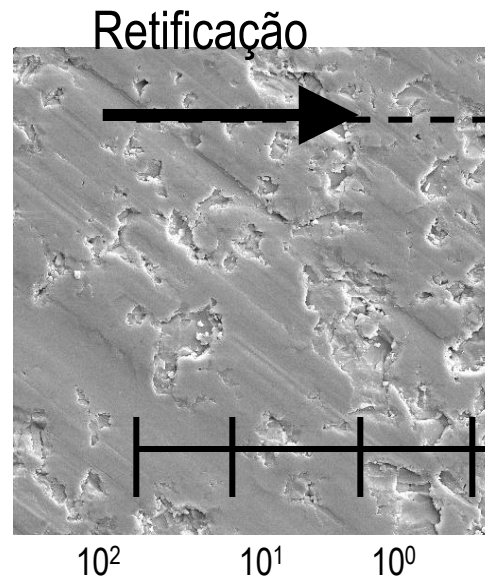
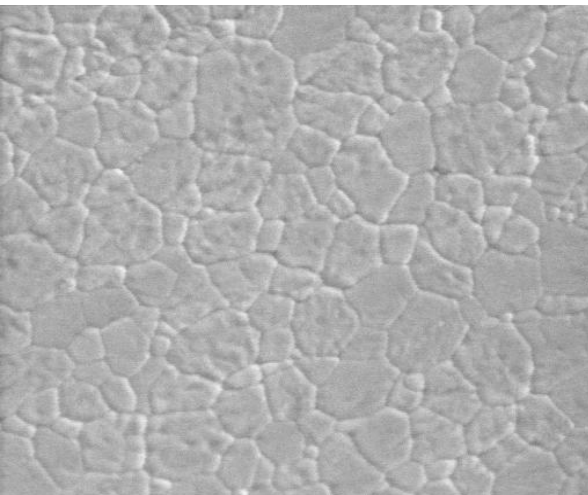
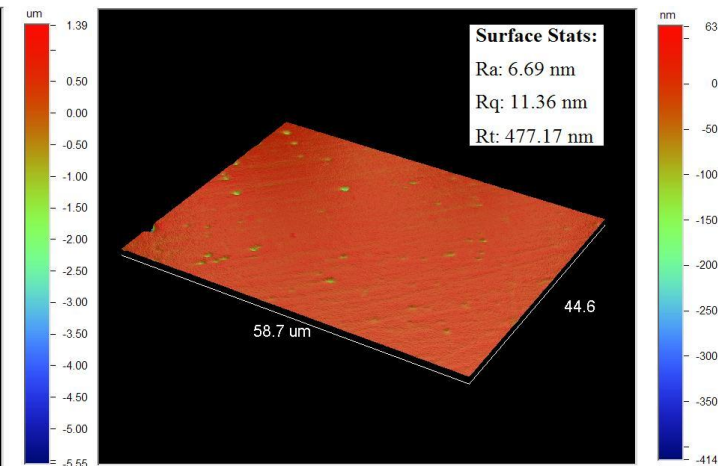
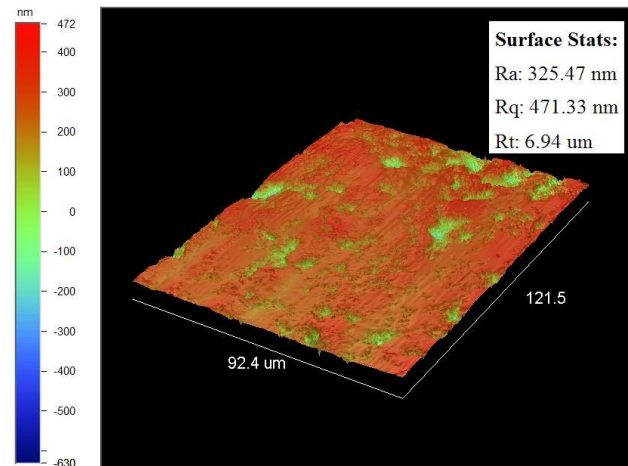
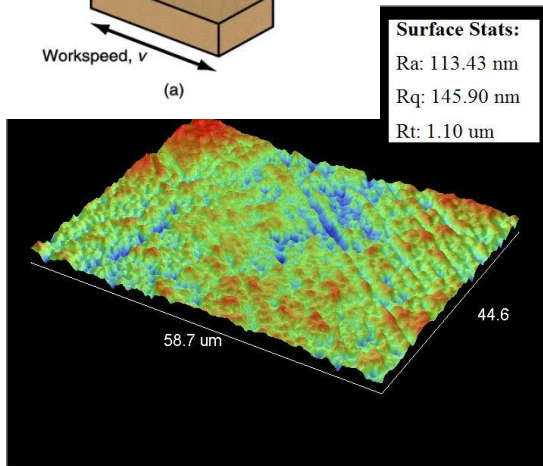
Polimento



Melhoria do Acabamento ( $R_a$ )



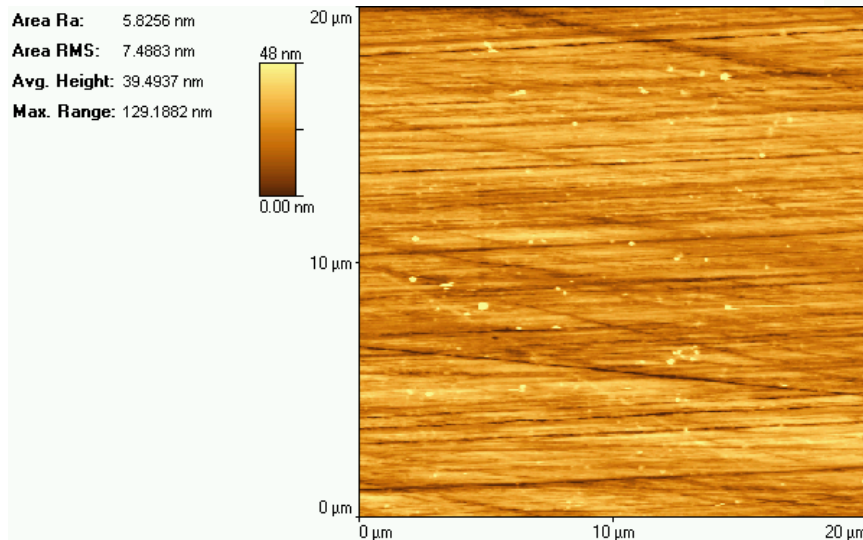
## Processos Dimensões de corte



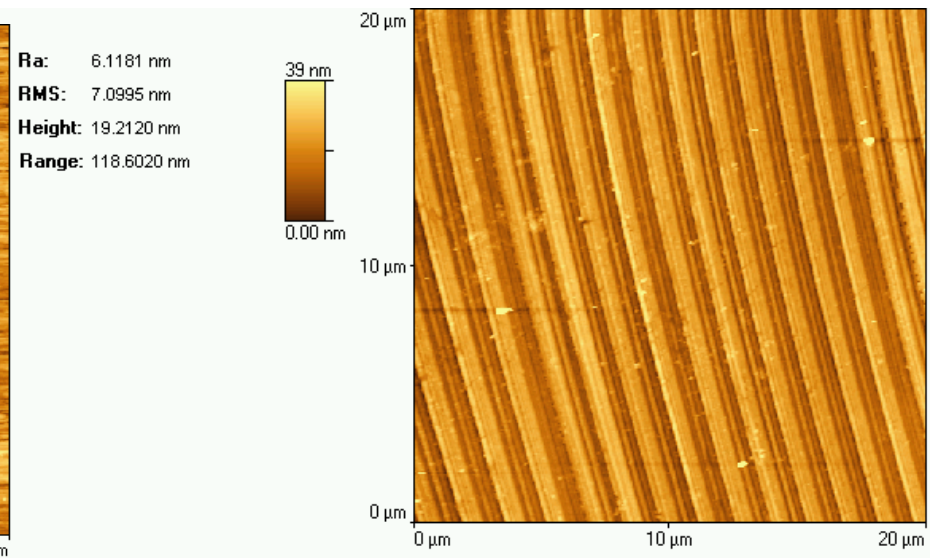
## Introdução

### Processos e Dimensões de corte

#### Polimento de Wafer de Si



#### Torneamento de Si



Existem diferenças a serem apontadas nestes dois casos?

## Introdução

A descoberta de se poder retificar materiais frágeis em regime dúctil, sem introdução de danos na sub-superfície, pode ser explicado pelo fenômeno de transição frágil dúctil.

Um material é considerado frágil quando não se observa qualquer deformação plástica antes da fratura .

## Princípios e Conceitos

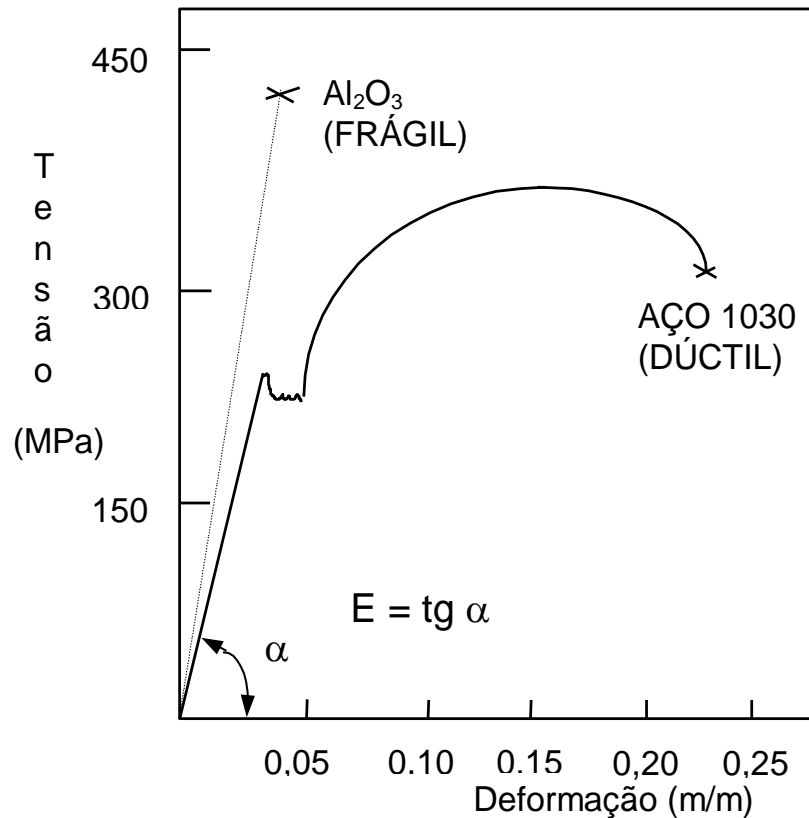


Figura 1\*

\* Zanotto, E.D., Migliore Jr., A.R., “Propriedades mecânicas de materiais cerâmicos: uma introdução”, Cerâmica, Vol. 37(247):7-16, Jan./Fev. 1991.

\*\*Giovanola, J.H., Finnie, I., “On the machining of glass” J. Mater. Sci., Vol.15, pp.2508-2514, 1980.

Sabe-se que(\*\*):

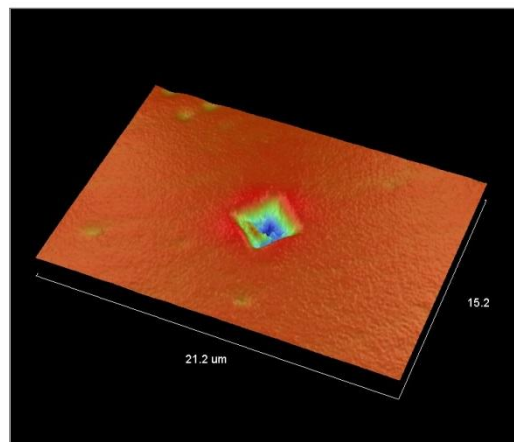
$$\sigma_f < \sigma_y < \sigma_{\text{ideal}}$$

Portanto, para se produzir escoamento plástico antes da ocorrência de fratura frágil,

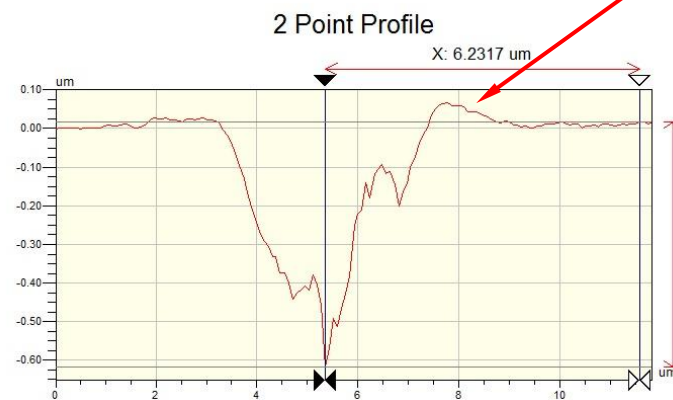
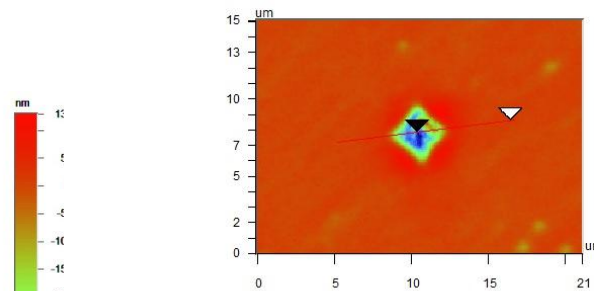
$$\sigma_y < \sigma_f < \sigma_{\text{ideal}}$$

# Introdução

Em escala nanométrica, até mesmo materiais frágeis se comportam plasticamente contanto que a energia potencial aumente sobre o volume submetido a endentação e não seja suficiente para iniciar trincas.



3YTZ polida



?

Rq	0.16 um
Ra	0.11 um
Rt	0.68 um
Rp	0.07 um
Rv	-0.62 um

Angle	102.42 mrad
Curve	-15.09 um
Terms	None
Avg Ht	-0.06 um
Area	-0.38 um <sup>2</sup>

Portanto, a retificação em modo dúctil de materiais frágeis torna-se possível quando a espessura nominal do cavaco for menor do que a espessura crítica para que a formação de trinca se instale<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Bifano, T. G., Dow, T. A. & Scattergood, V. 1991 Ductile-regime grinding: a new technology for machining of brittle materials. *Trans. ASME* **113**, 184–189. (doi:10.1115/1.2899676)



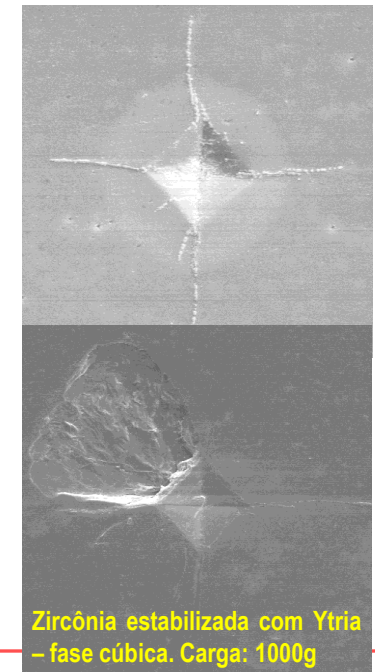
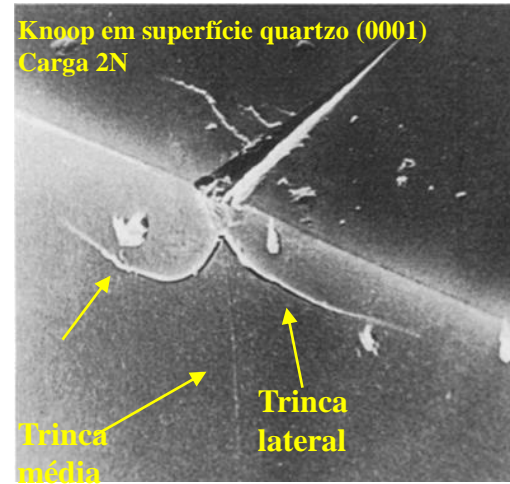
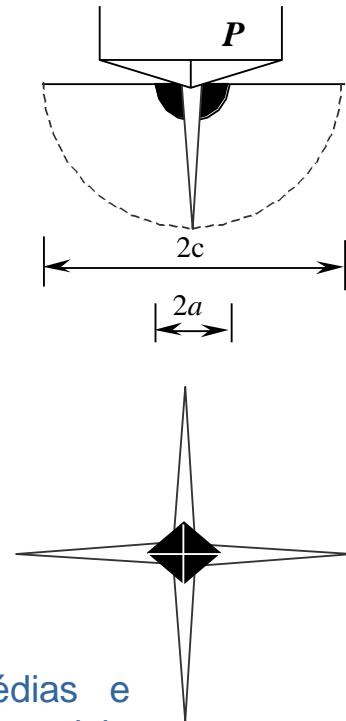
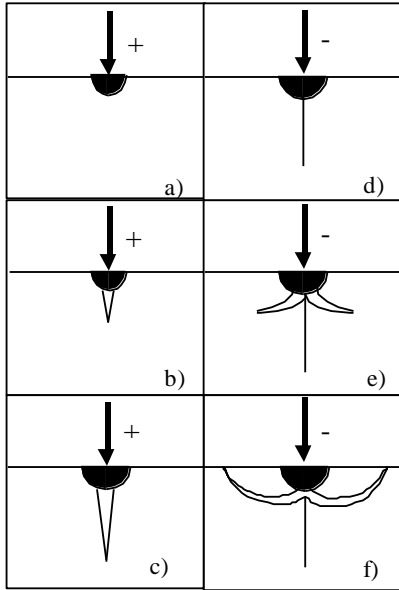
## Princípios e Conceitos

“Corpos pequenos possuem uma capacidade reduzida para armazenar energia e portanto exigem tensões de fratura maiores. Assim, quando um corpo é reduzido, a tensão de fratura irá crescer a uma tal dimensão que no lugar de fratura irá ocorrer escoamento plástico”

K. Kendall (1978)

Kendall, K., “Complexities of compression failure”, Proc. of Royal Soc. London A.361, pp.245-263, 1978

# Princípios - Endentação



Sistemas de Trincas radiais-médias e laterais. a) Evolução durante o ciclo completo de carregamento (+) e descarregamento (-). Região escura denota a zona de deformação irreversível. b) Parâmetros geométricos do sistema radial ( $c$  é o tamanho da trinca e  $a$  é diagonal da marca permanente) \*

Já Foi demonstrado que quando se mantém a pressão hidrostática e a espessura crítica de corte, consegue-se obter uma superfície livre de trincas, ou seja, a usinagem em regime dúctil.

A Usinagem em regime dúctil de materiais duros e frágeis exige que a máxima espessura de corte não exceda um valor crítico ou a máxima espessura crítica do cavaco para que se evite a formação de microtrincas.

Marshal et al [1] demonstrou através de testes de endentação que espessura crítica específica do cavaco depende do Módulo de Young (E), Dureza Knoop ou Vickers e da tenacidade crítica de fratura ( $K_{IC}$ ) do material:

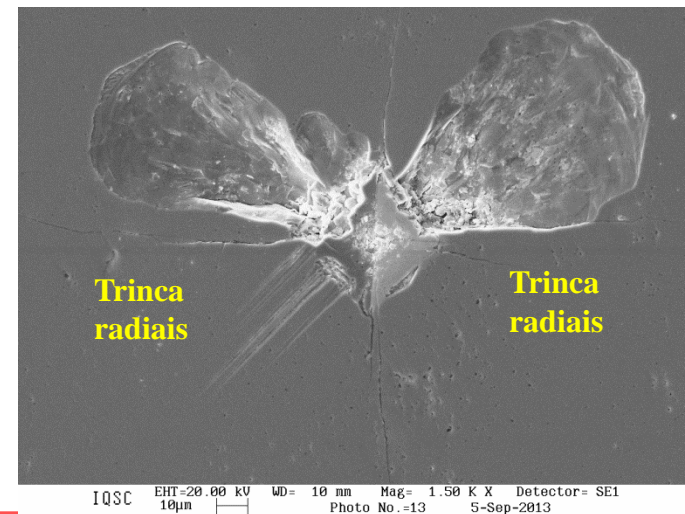
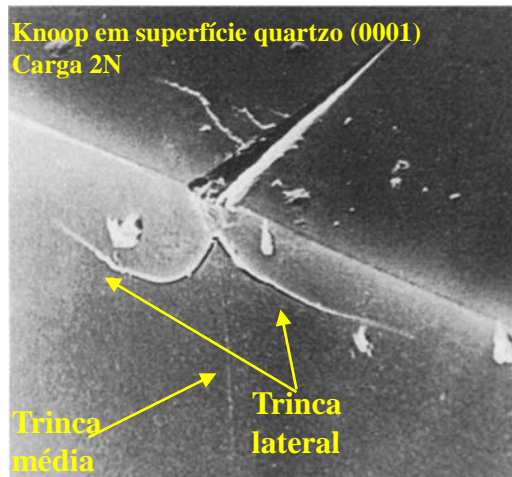
$$h_{crit} = \left( \frac{E}{H_k} \right) \left( \frac{K_{IC}}{H_k} \right)^2$$

**Através desta formula a espessura crítica pode ser estimada**

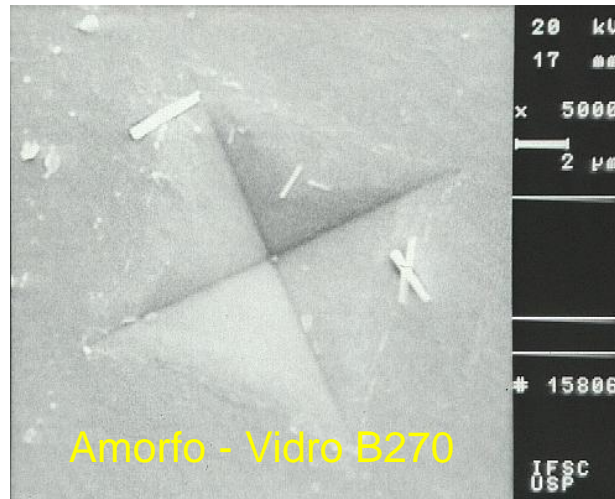
[1] Marshall DB, Lawn BR, Cook RF (1987) Microstructural Effects on Grinding of Alumina and Glass-ceramics. Communications of the American Ceramic Society 70(6):139–140.

## Princípios - Endentação

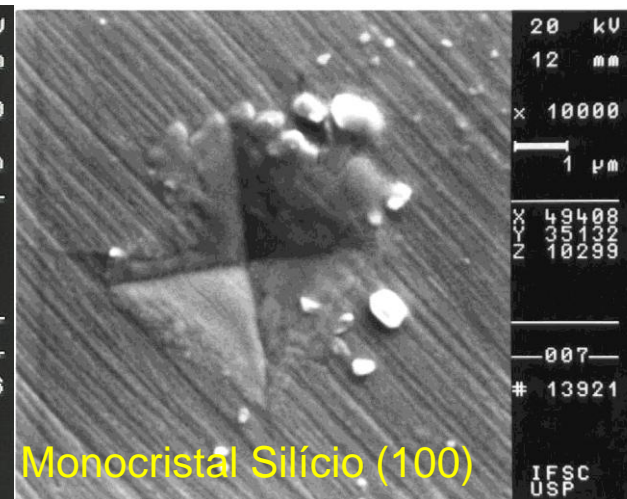
- *Sob a marca do endentador há uma zona de deformação plástica*
- Dois sistemas de trincas:
  - Trincas radiais/médias: associadas a resistência a degradação
  - Trincas laterais: associadas com a remoção de material
- Este conceito foi aplicado para o carregamento estático normal



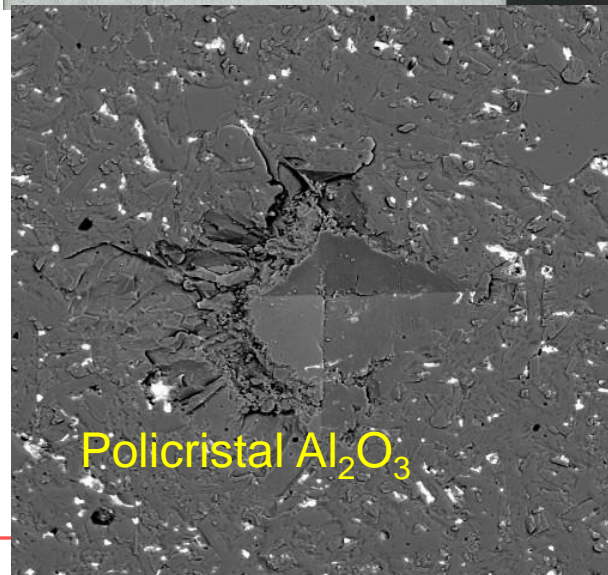
## Análise dos Mecanismos de Deformação em Micro endentação



Amorfo - Vidro B270



Monocristal Silício (100)

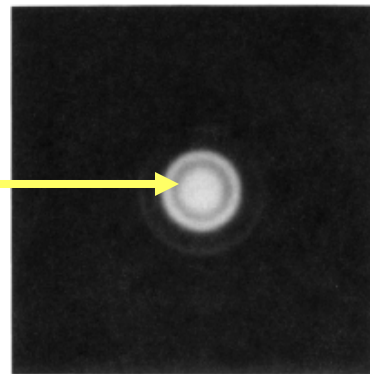
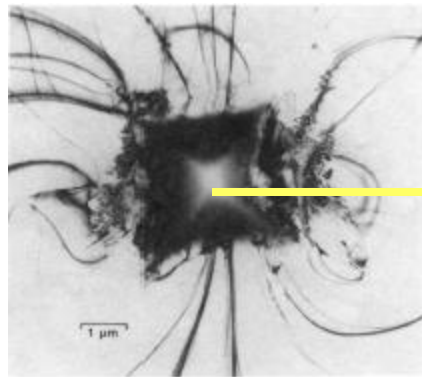


Policristal  $\text{Al}_2\text{O}_3$

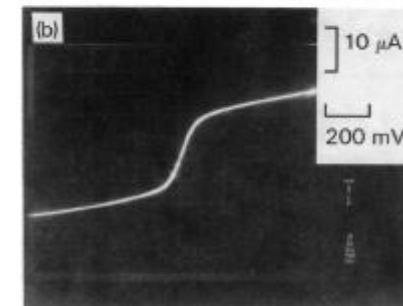
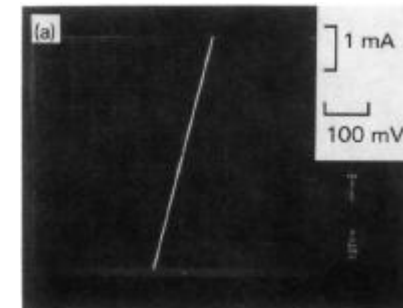


Policristal 3 YTZ

## Análise dos Mecanismos de Deformação em Micro endentação



**MET da endentação Vickers em Si e padrão de difração de elétrons da região central da endentação**



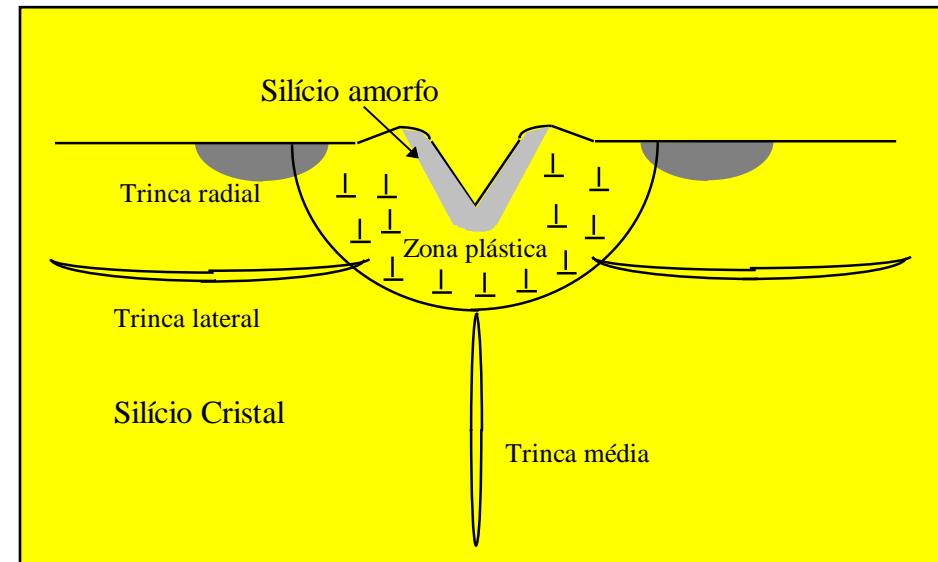
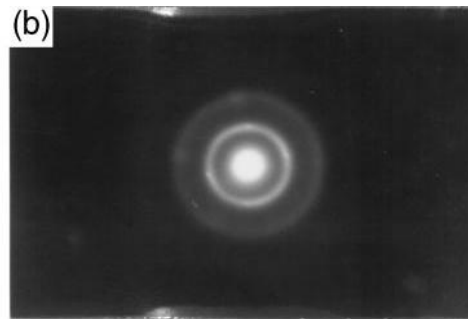
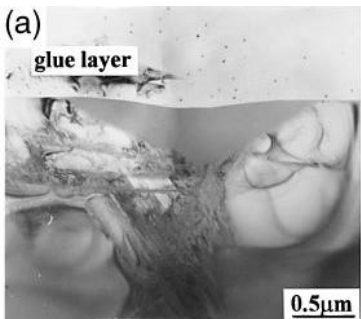
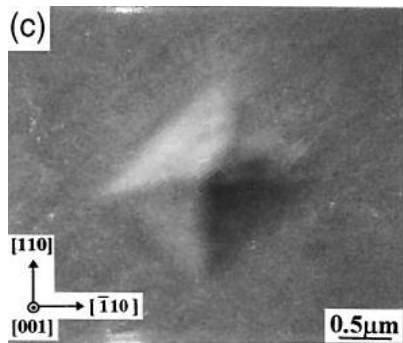
Clarke, D.R., Kroll, M.C., Kirchner, Cook, Rf., Hockey, “Amorphization and conductivity of Si and Ge during indentation”, Phys. Rev. Lett., 60(21): 2156-2159, May 1988.

**Comportamento da Condutividade elétrica para o Si entre eletrodos (a) durante a endentação (sob carregamento) e (b) após endentação. A mudança na escala indica um aumento na condução de duas ordens de magnitude entre (b) e (a).**

# Análise dos Mecanismos de Deformação em Micro endentação

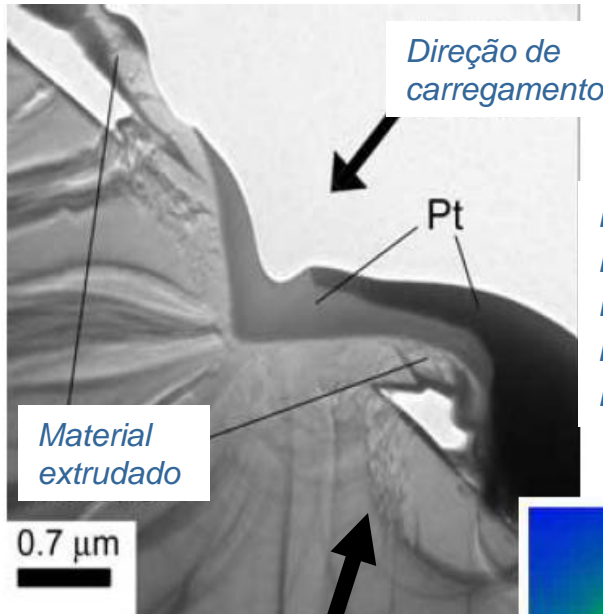
1. Gerk, A. P., Tabor, D., "Indentation hardness and semiconductor-metal transition of germanium and silicon", NATURE, Vol.271, p.732-733, Feb. 1978.

Sólido	Pressão de Transição (kbar)	Dureza (indentação) (kbar)
Si	190 (155)*	120
Ge	120	80



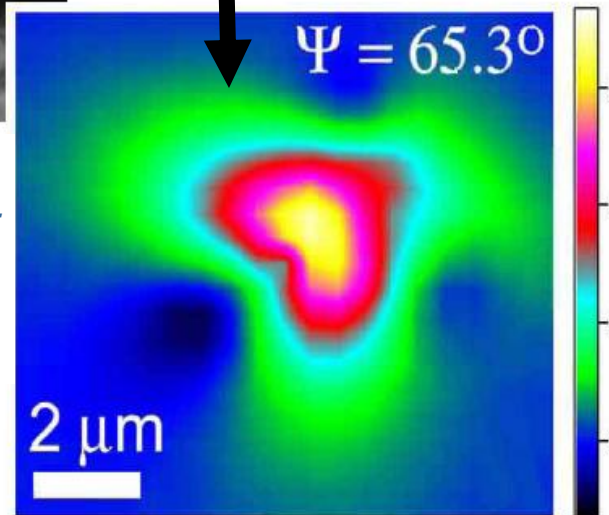
Wu, Y.Q., Shi, G.Y., Xu, Y.B. Cross-sectional observation on the indentation of [001] silicon. JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH Volume: 14 Edição: 6 Páginas: 2399-2401

## Análise dos Mecanismos de Deformação em Micro endentação

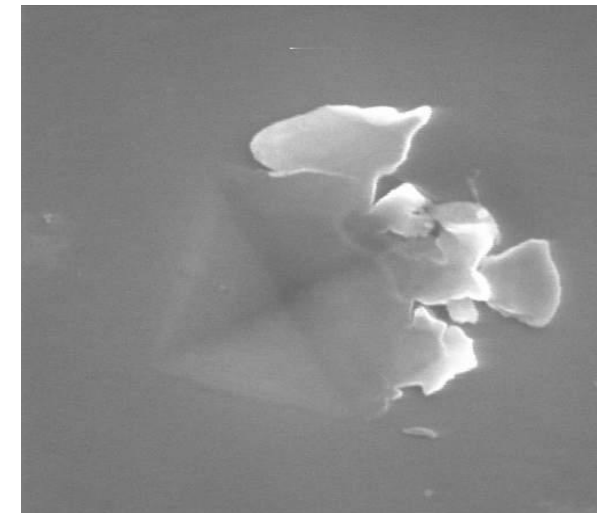


Mapa de espectroscopia  
Micro-Raman das tensões  
residuais no interior de uma  
impressão com endentador  
Berkovich em Ge

Seção transversal  
feita através de MET  
de um endentação  
Vickers em Si

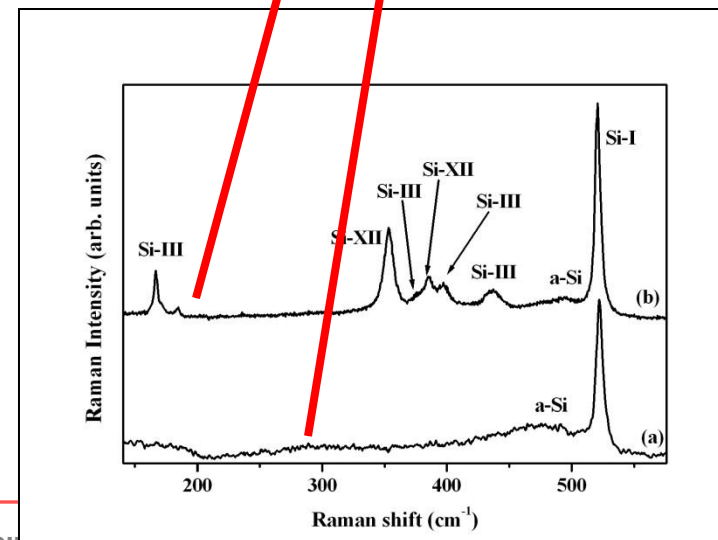
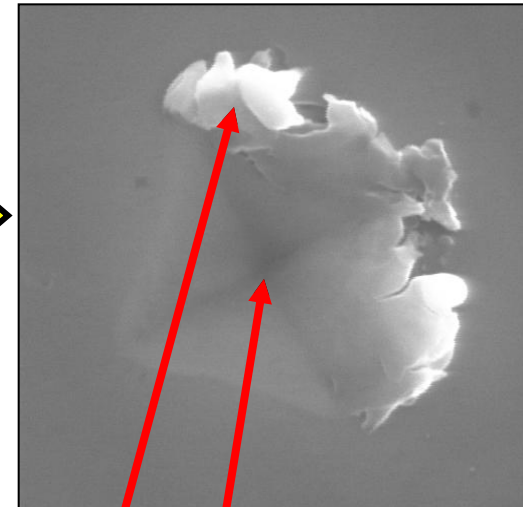
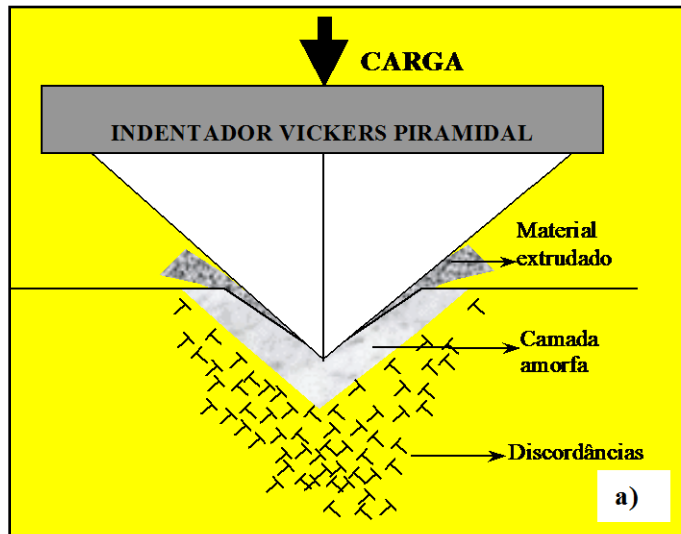


Vista planar de um  
endentação Vickers  
feita em Si com ciclo  
de 5 x e carga de 10 g





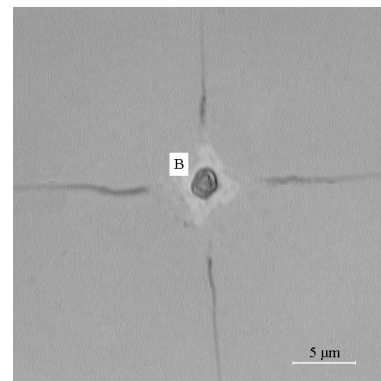
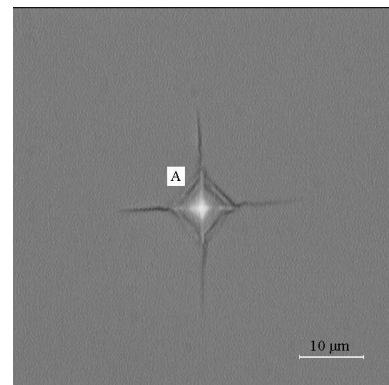
## Análise dos Mecanismos de Deformação em Micro endentação



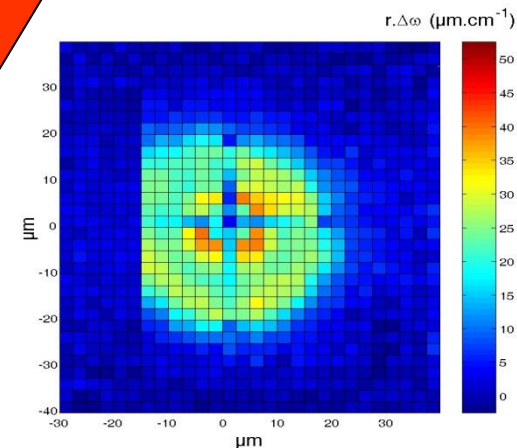
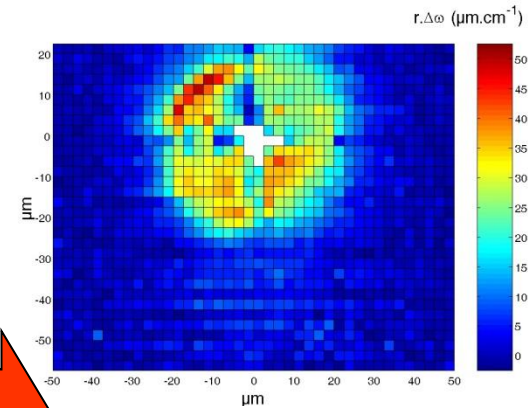
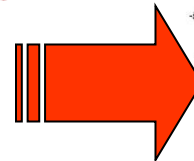
# Avaliação das transformações impostas pela microendentação

## Mapeamento das tensões residuais na endentação

Imagens feitas de amostra endentada (100g); A) antes do polimento químico e B) após polimento químico



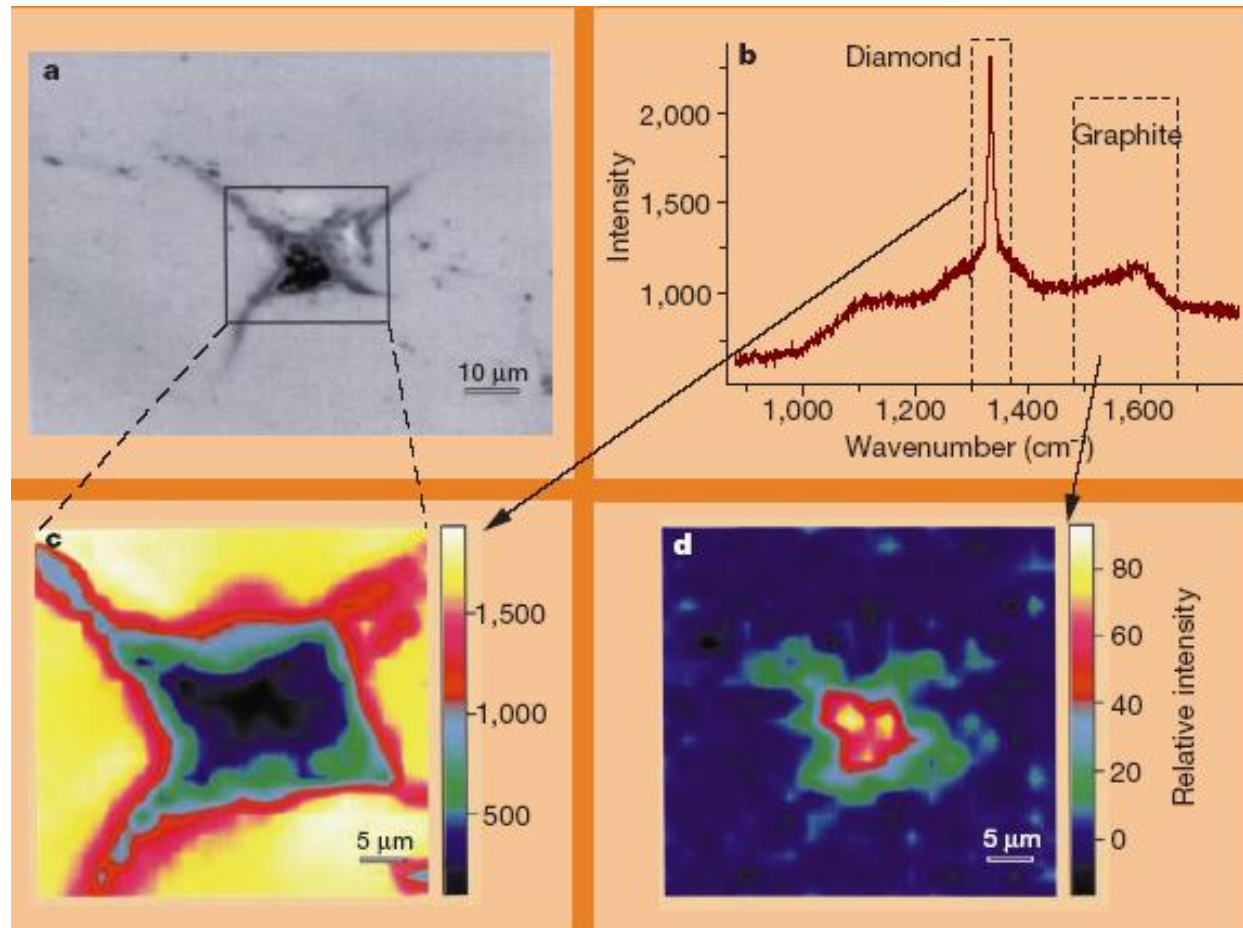
JCR



PUECH, P. ; et al.. . Mapping of the 3D - Strain Field around a Micro-Indentation on Silicon using Polishing and Raman Spectroscopy. Journal of Applied Physics , EUA, v. 88, n.8, p. 4582-4585, 2000.

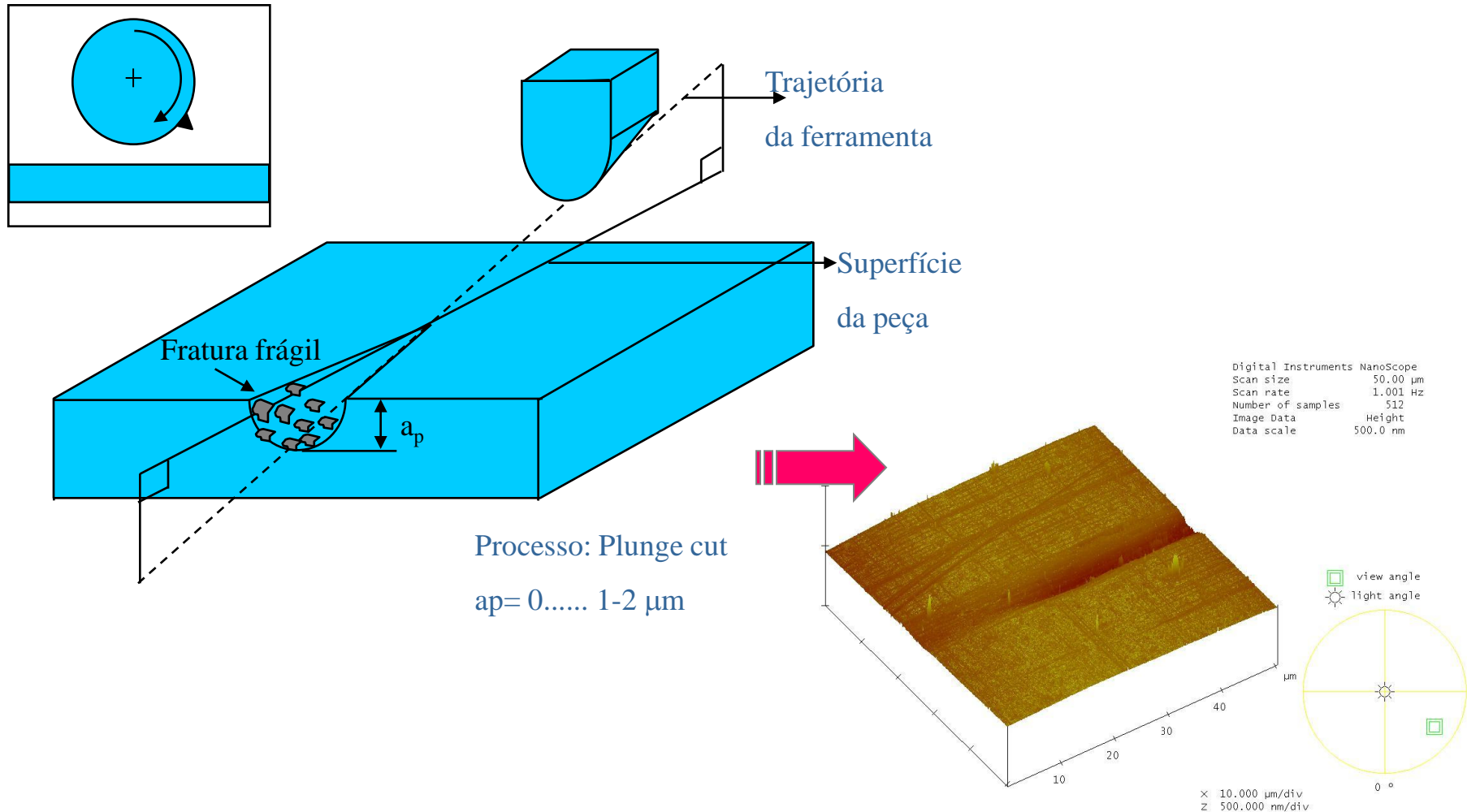
# Análise dos Mecanismos de Deformação em Micro endentação

## Transformação de Diamante em grafite



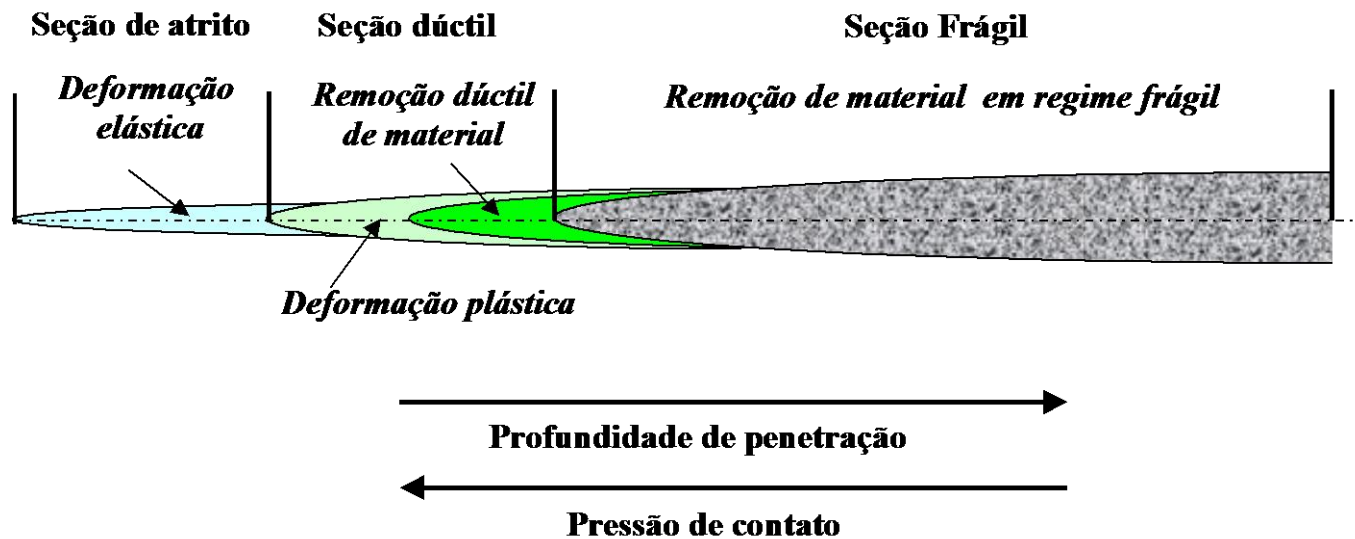
Gogotsi, Y, Kailer, A., Nickel, K.G., Transformation of diamond to graphite, Nature, oct. 14th 1999, Vol. 401 pp.663-664

# Análise dos Mecanismos de Deformação em Micro Riscamento



vidrod.009.txt

## Análise dos Mecanismos de Deformação em Micro Riscamento



## Crack formation in silicon observed in plunge-cut experiments with a negative rake diamond tool with and without applying hydrostatic pressure [31].

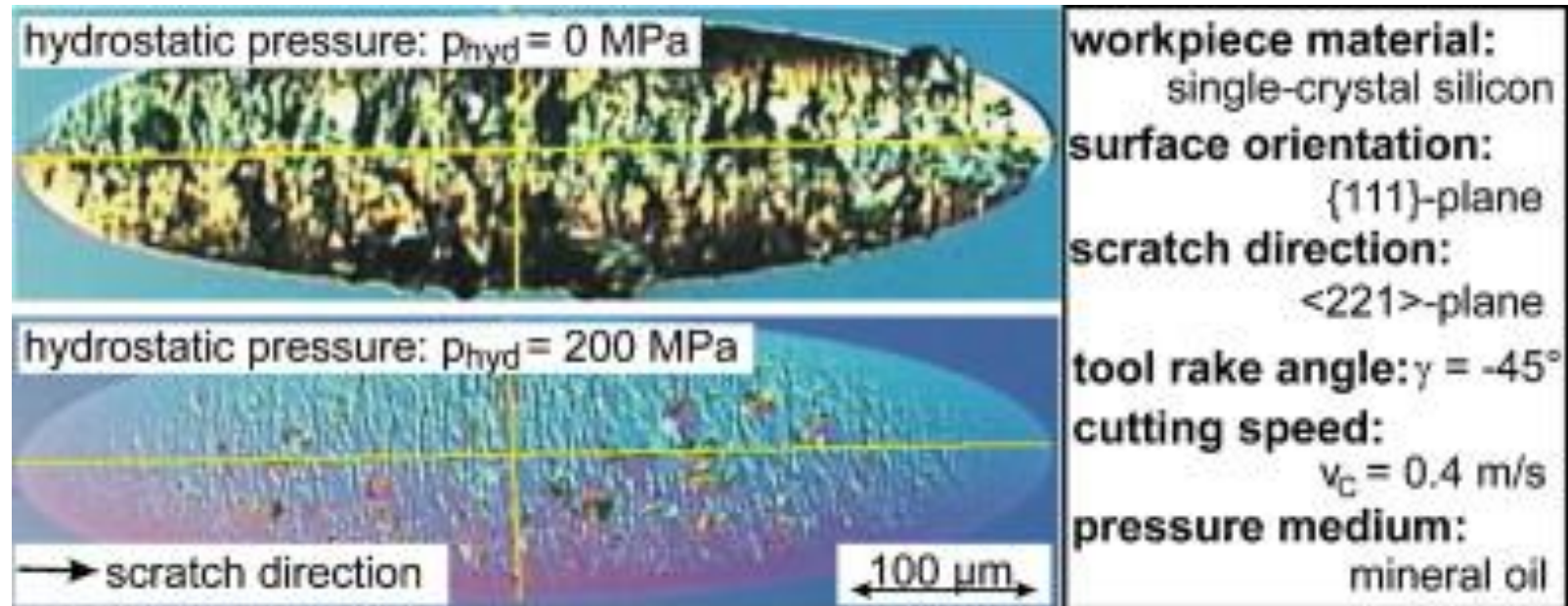


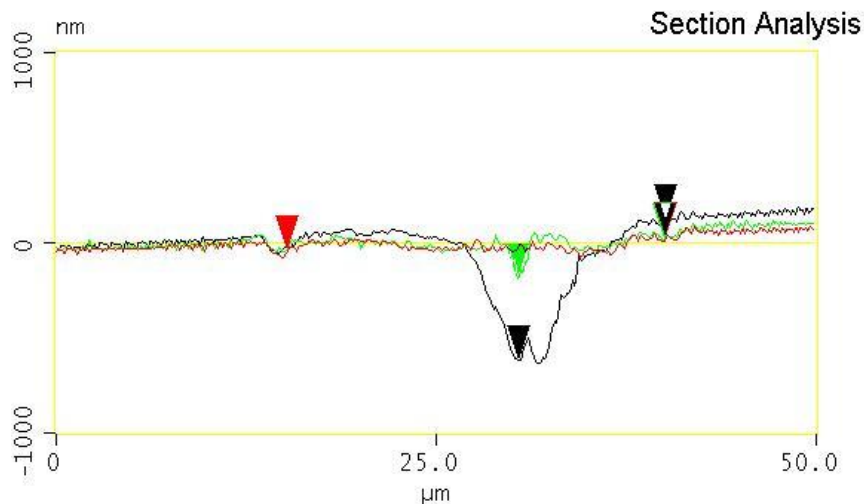
Fig.. Nomarski microscope images of silicon scratch tracks generated under ambient pressure (top) and 200 MPa hydrostatic pressure (bottom) [22].

Brinksmeier, E., Rickens, K. & Grimme, D. 2001 Duktiler Materialabtrag beim Schleifen sprödharter Werkstoffe. In *Jahrbuch Schleifen Honen Läppen und Polieren*, vol. 63 (ed. H.-W. Hoffmeister), pp. 50–67. Essen, Germany: Vulkan-Verlag.

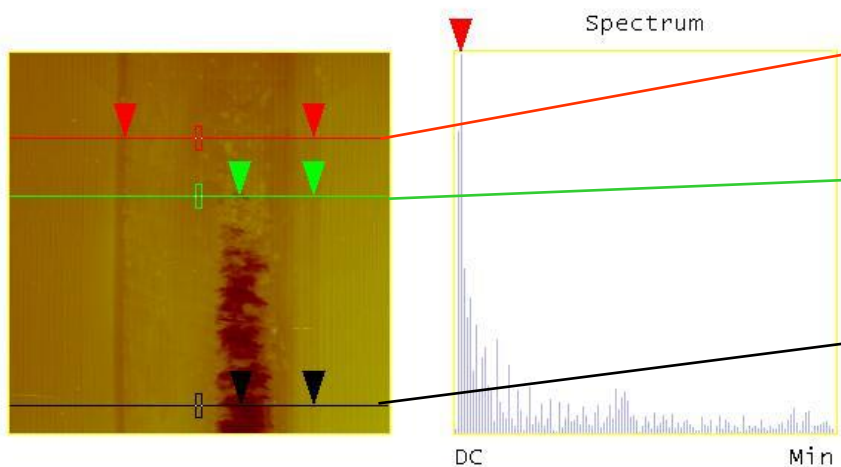


# Análise dos Mecanismos de Deformação em Micro Riscamento

Cursor Marker Spectrum Zoom Center Line Offset Clear



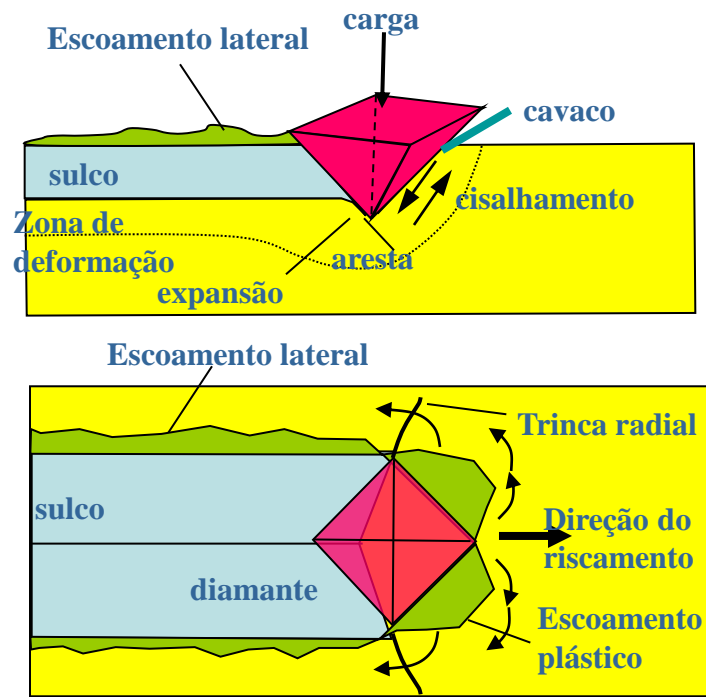
L	24.902 μm
RMS	24.259 nm
lc	25.000 μm
Ra(lc)	9.262 nm
Rmax	125.98 nm
Rz	73.456 nm
Rz Cnt	valid
Radius	463.09 μm
Sigma	44.206 nm



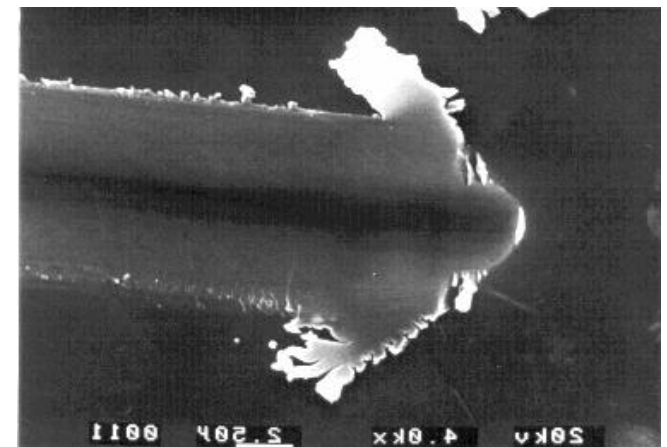
Surface distance	25.021 μm
Horiz distance(L)	24.902 μm
Vert distance	70.438 nm
Angle	0.162 °
Surface distance	9.769 μm
Horiz distance	9.668 μm
Vert distance	209.08 nm
Angle	1.239 °
Surface distance	9.876 μm
Horiz distance	9.668 μm
Vert distance	742.90 nm
Angle	4.394 °
Spectral period	25.000 μm
Spectral freq	0.040 /μm
Spectral RMS amp	0.046 nm

vidrod.001.txt

## Análise dos Mecanismos de Deformação em Micro Riscamento



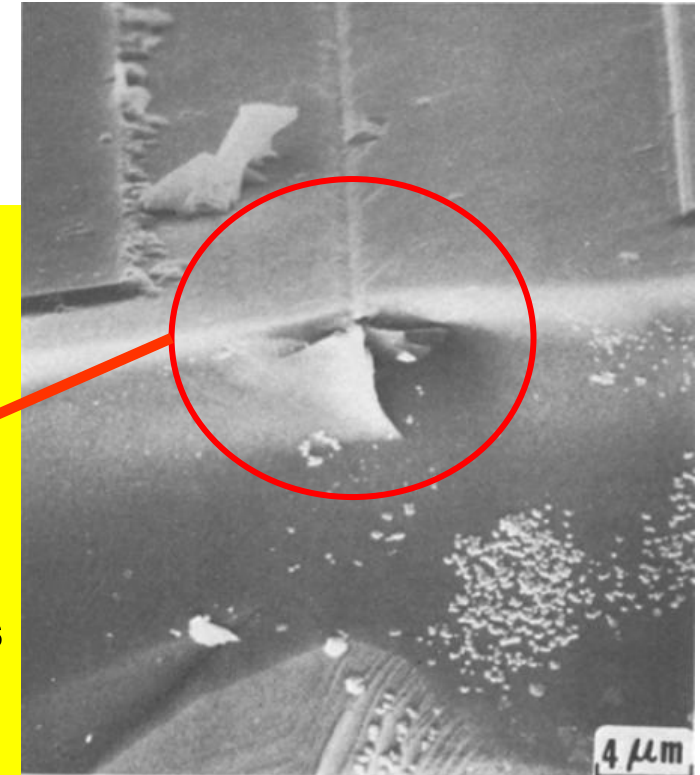
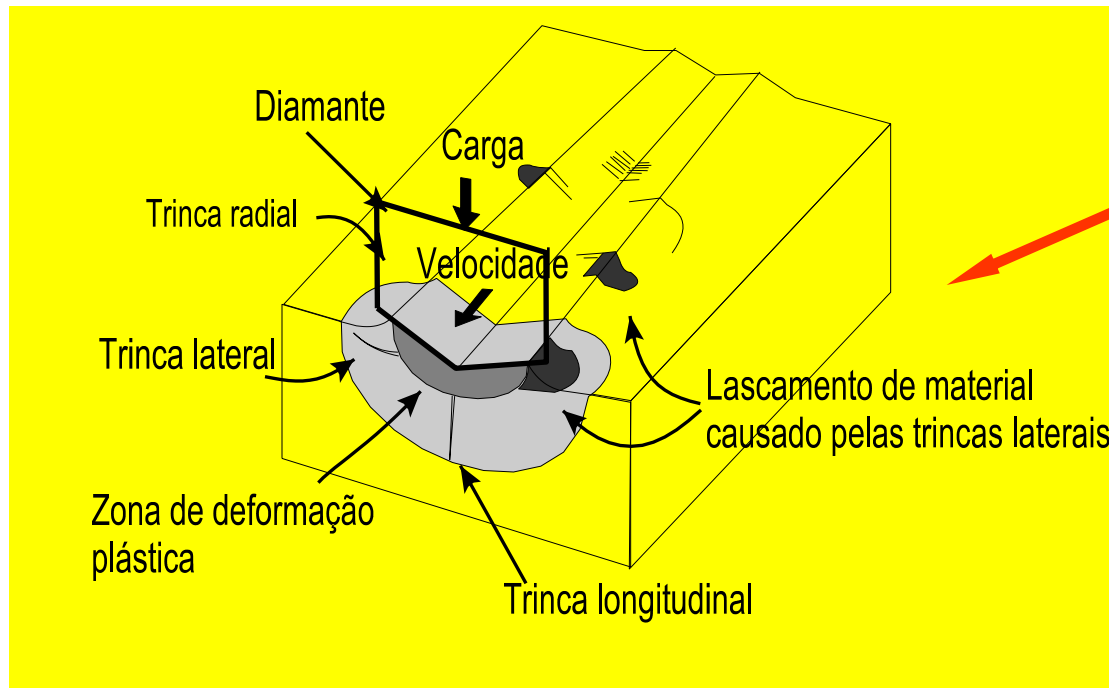
Riscamento em Silício (100) com endentador Vickers





## Análise dos Mecanismos de Deformação em Micro Riscamento

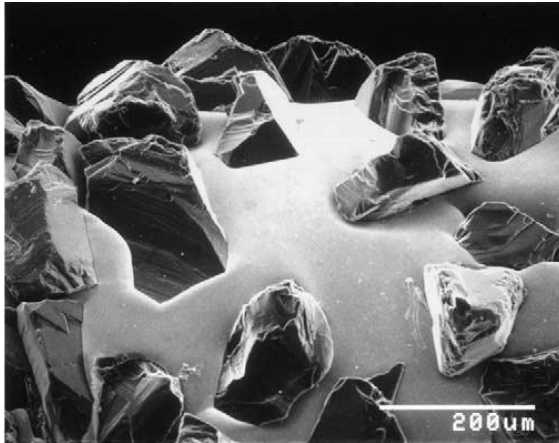
Desenho esquemático dos processos de danos associados ao riscamento (esclerometria)



Fotografia de MEV mostrando trincas média e laterais abaixo do riscamento. O início da trinca na direção  $[110]$ . O segundo risco, qual foi posteriormente propagado através de “bending”, está na direção  $[11\bar{2}]$  com fratura sobre o plano (110). (Finnie & Misra, 1979)

Finnie, I., Misra, A., On the scribing and subsequent fracturing of silicon semiconductor wafers, J. Mater. Science, 14, 2567-74, 1979.

# Forma das Trincas formadas em retificação de cerâmica



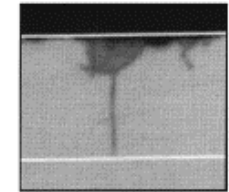
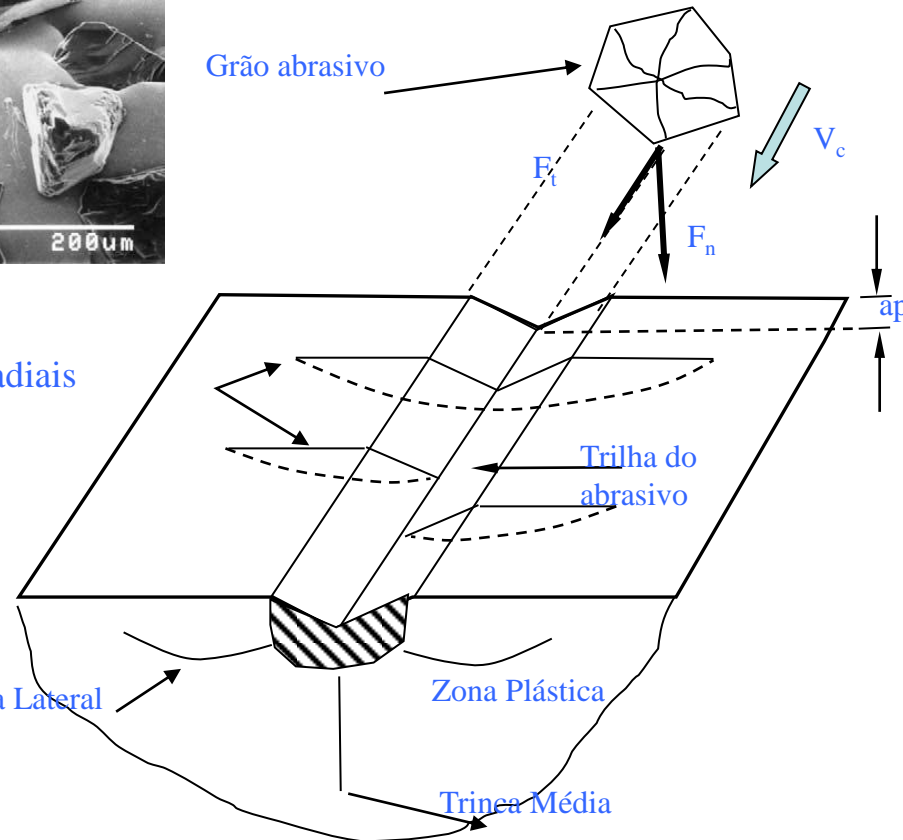
Trincas radiais

Trinca Lateral

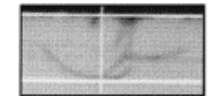
Zona Plástica

Trinca Média

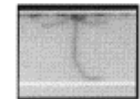
Grão abrasivo



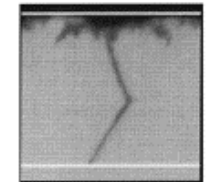
(a) Median ( $d = 15.9 \mu\text{m}$ )



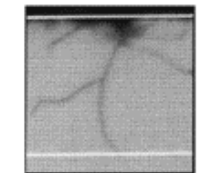
(b) Lateral ( $d = 8.2 \mu\text{m}$ )



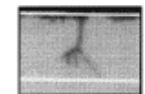
(c) "Umbrella" ( $d = 9.1 \mu\text{m}$ )



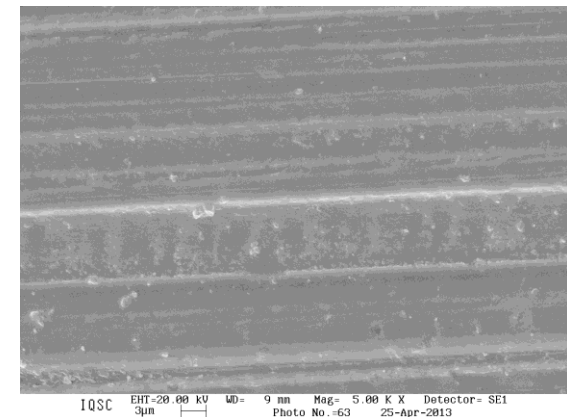
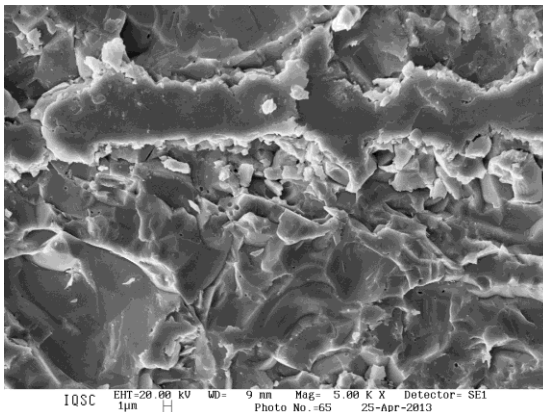
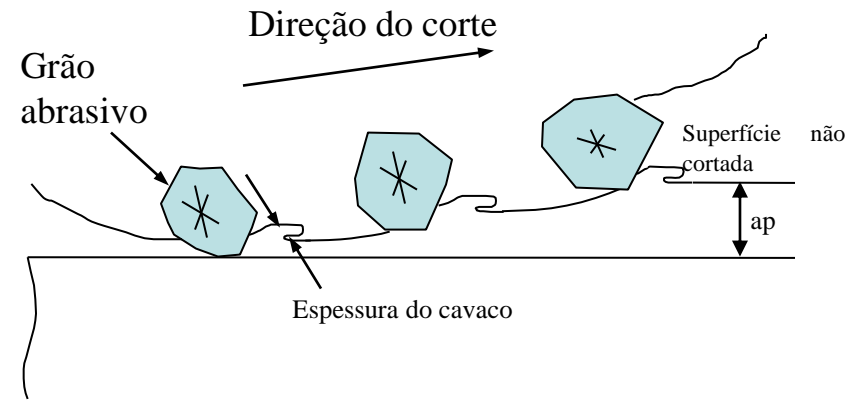
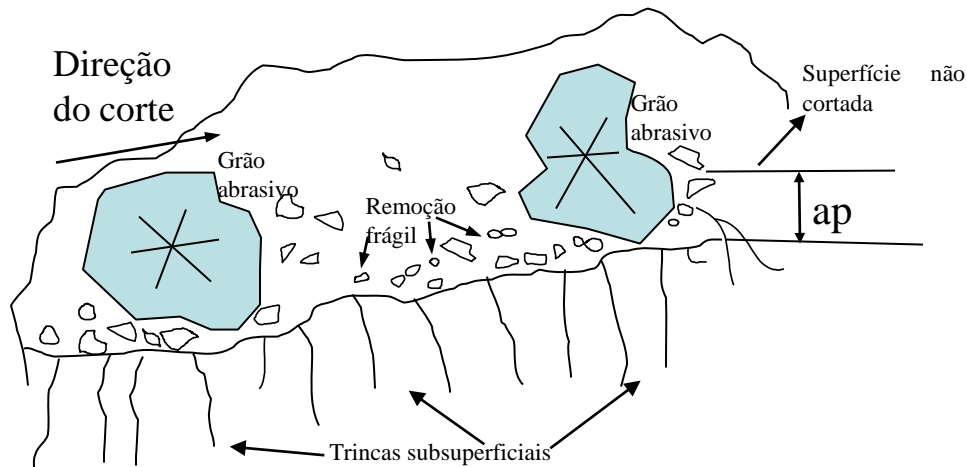
(d) "Chevron" ( $d = 19.9 \mu\text{m}$ )



(e) "Branch" ( $d = 17.8 \mu\text{m}$ )



(f) "Fork" ( $d = 8.2 \mu\text{m}$ )



**Remoção em regime Frágil:** a remoção ocorre através de propagação e intersecção de trincas

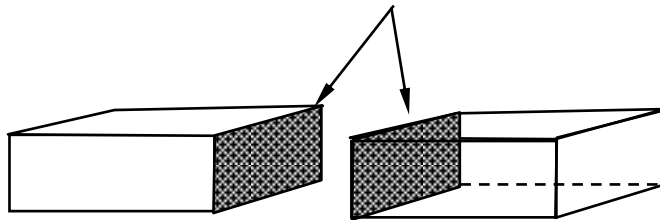
**Remoção em regime Dúctil:** ocorre por meio de deformação plástica do material na forma de cavacos cisalhados

Mas como estudar os mecanismos de remoção de material na Retificação de Materiais Frágeis?

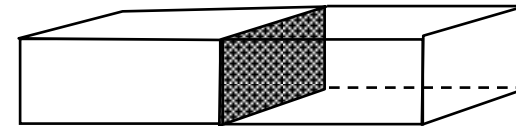
## Método para estudo da usinagem de cerâmica:

### Endentação e Riscamento

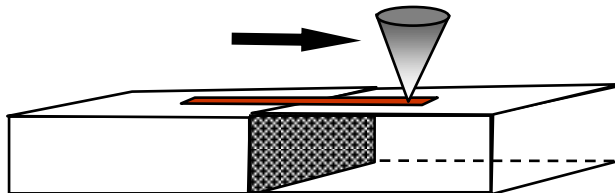
Superfícies polidas



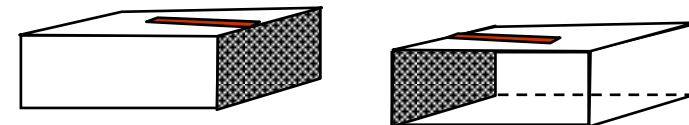
Superfícies coladas



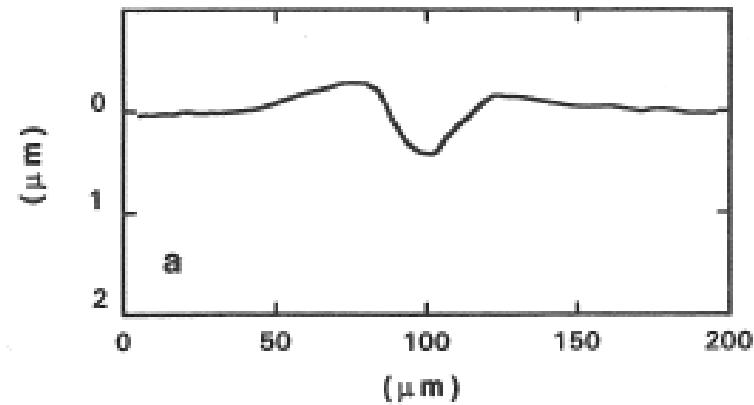
Polida e riscada



Cola dissolvida e análise dos danos

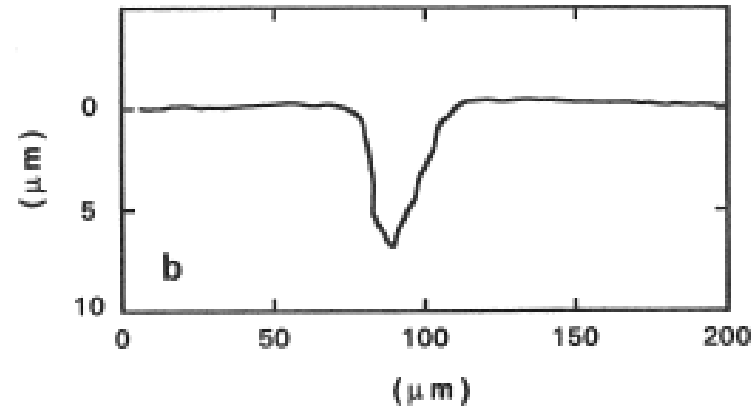


Carga : 20 N

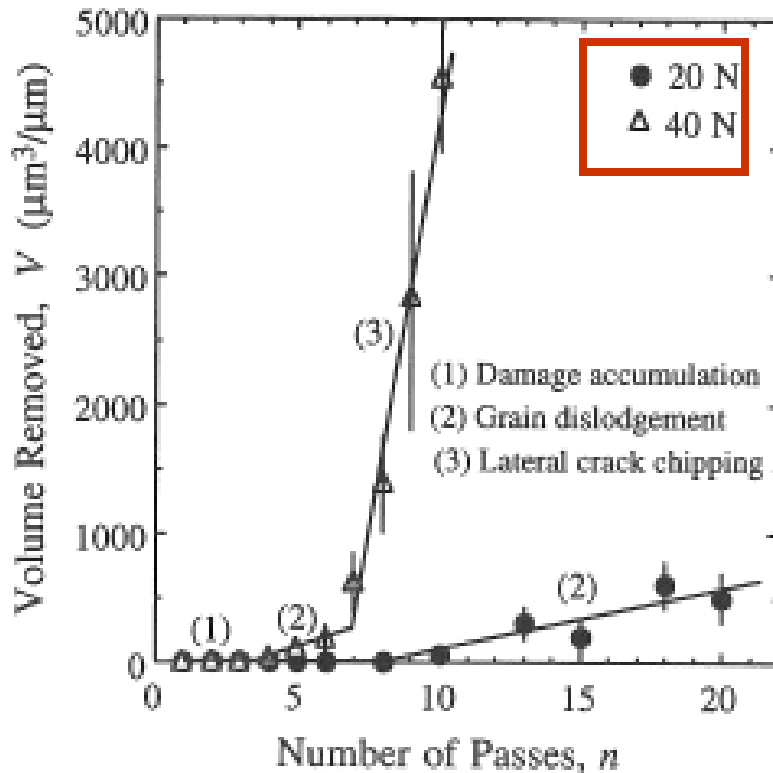


1 passo

Material: Alumina  
Tamanho de grão:  
3  $\mu\text{m}$



10 passos

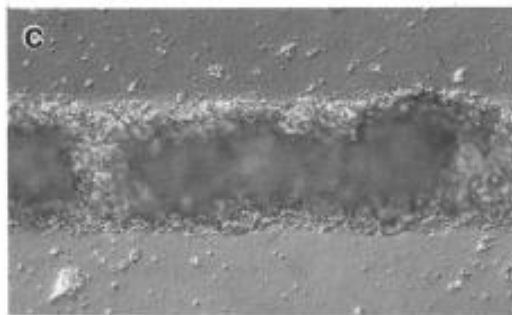
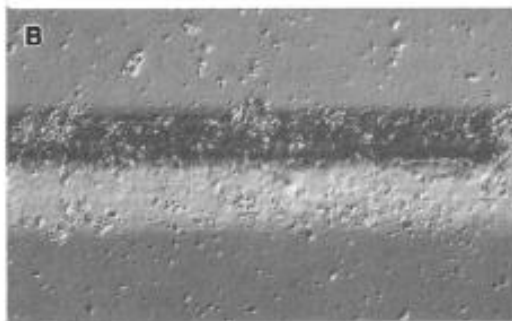
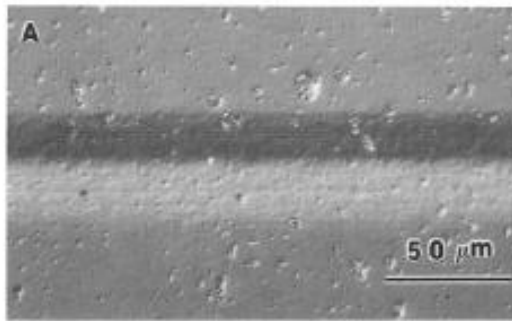


Mecanismos de remoção:

(1) Acumulo de defeito

(2) Desalojamento de grão

(3) Lascamento por trincas laterais



20N

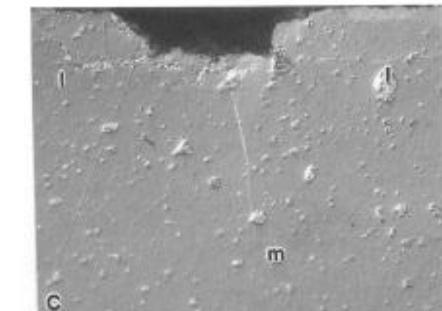
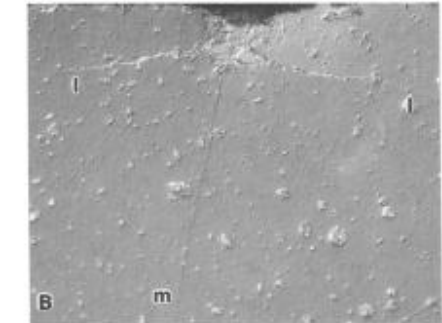
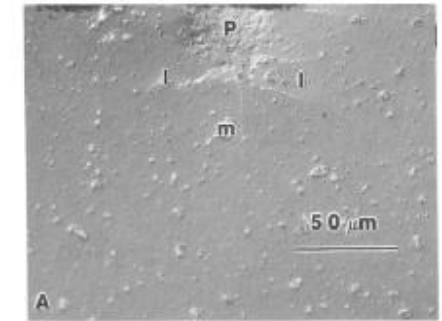
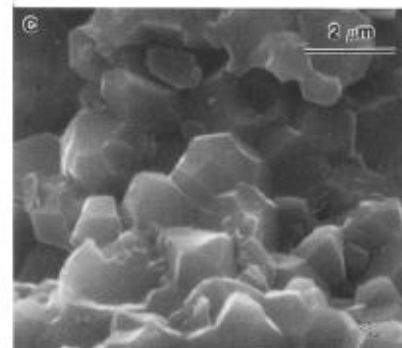
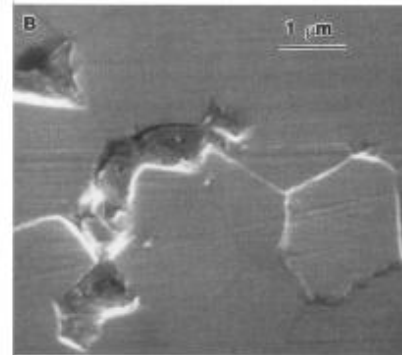
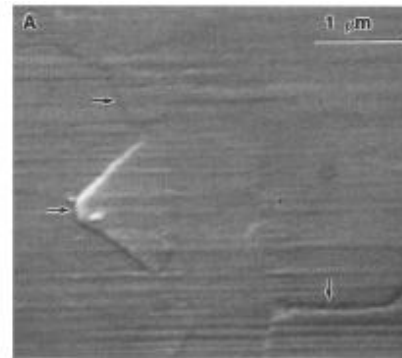


Fig. 2. Optical micrographs with Nomarski illumination of scratches made at a load of 20 N after (A) 1 pass, (B) 5 passes, and (C) 10 passes.

Fig. 3. SEM micrographs of the surface damage corresponding to Figs. 2A-C. Arrows in A point to grain boundary microcracks.

Fig. 4. Optical micrographs of section views showing subsurface damage corresponding to Figs. 2A-C. Note classical lateral and median cracks, denoted by 'l' and 'm', extending from the plastic zone 'P' beneath the contact area.



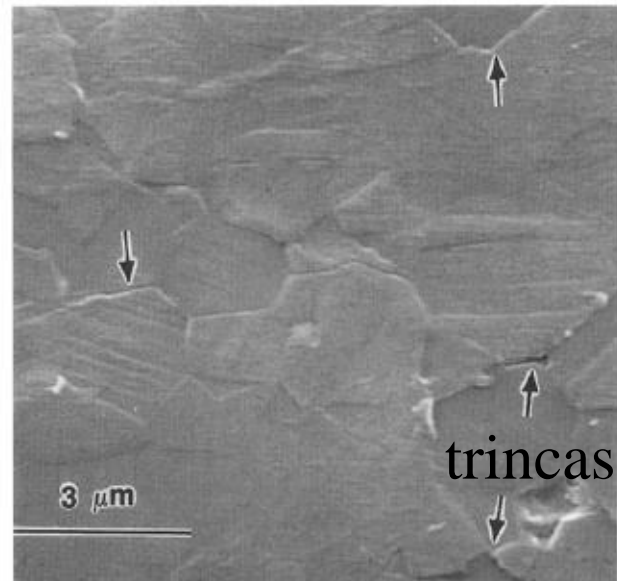
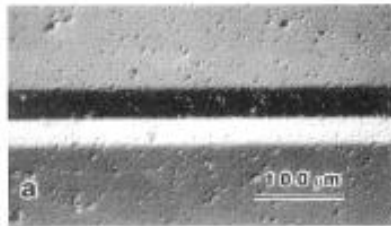
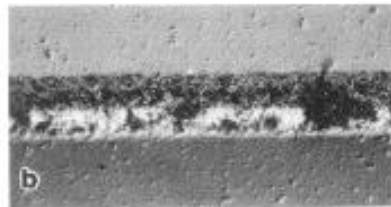


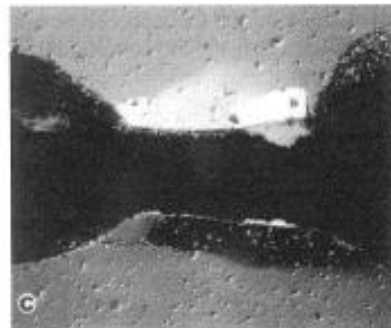
Fig. 5. SEM view of the area within the plastic zone P in Fig. 4A showing intergranular microcracks (indicated by arrows) and intragrain twin/slip bands.



1 passo



5 passos



10  
passos

FIGURE B Optical micrographs with Nomarski illumination of the scratches in the fine-grain alumina at 40 N after different passes: (a) one; (b) five; and (c) 10. Note in (c) lateral crack chipping (From Ref. 32.)

40N

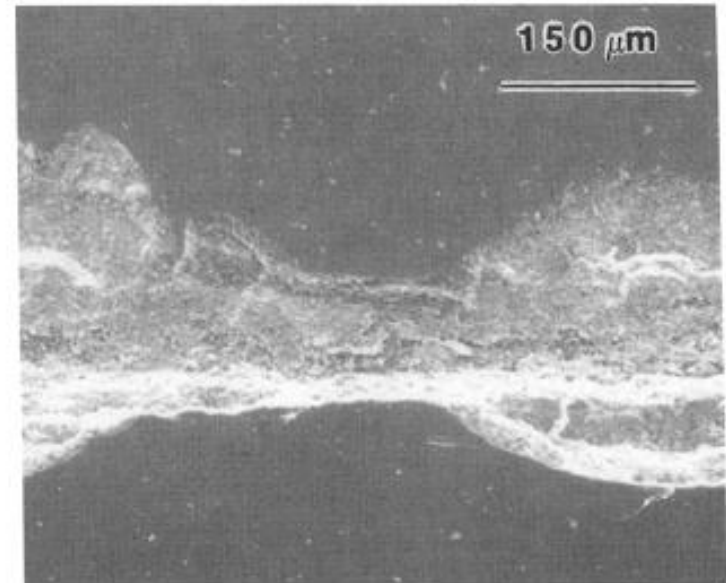


Fig. 6. SEM micrograph of the scratch produced at 40 N and  $n = 10$ . Material removal outside the scratch is by lateral crack chipping.

## Efeito do tamanho do grão sobre a taxa de remoção

TABLE I Grain Size and Mechanical Properties of Alumina

Material	Grain diameter (μm)	Strength (MPa)	$T_{short}^a$ (MPa·m <sup>1/2</sup> )	$T_{long}^a$ (MPa·m <sup>1/2</sup> )	H <sup>b</sup> (GPa)
1	3	610	2.8 ± 0.3	2.8 ± 0.3	24.4 ± 2.0
2	9	500	2.5 ± 0.2	2.8 ± 0.1	18.7 ± 2.1
3	15	400	2.3 ± 0.2	2.9 ± 0.3	19.0 ± 1.0
4	21	330	2.0 ± 0.2	3.5 ± 0.4	19.2 ± 2.0
5	35	230	1.8 ± 0.2	4.0 ± 0.4	19.0 ± 0.8

<sup>a</sup>Determination of values for  $T_{short}$  and  $T_{long}$  and the associated uncertainties are described in [37].

<sup>b</sup>Uncertainties are expressed as ±1 standard deviation about the mean.

(From Ref. 36, 38.)

- a) Avaliação do efeito do tamanho do grão no volume de remoção sob carga de 20N
- b) Avaliação do efeito da variação da carga sobre o tamanho do grão no volume de remoção

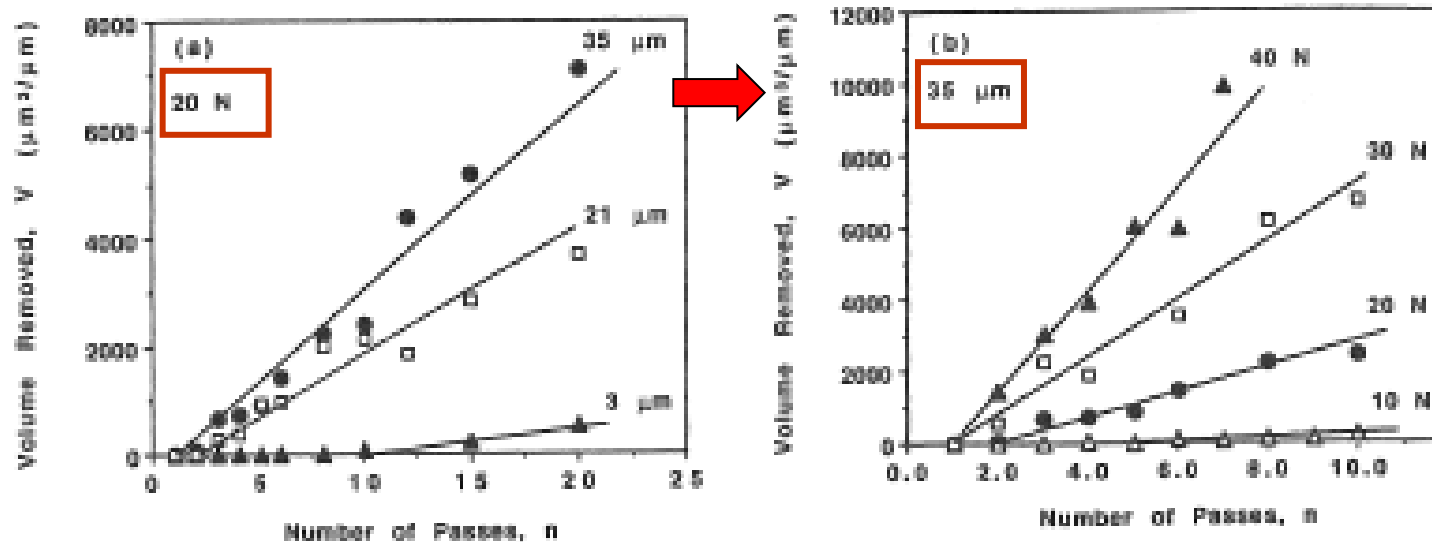
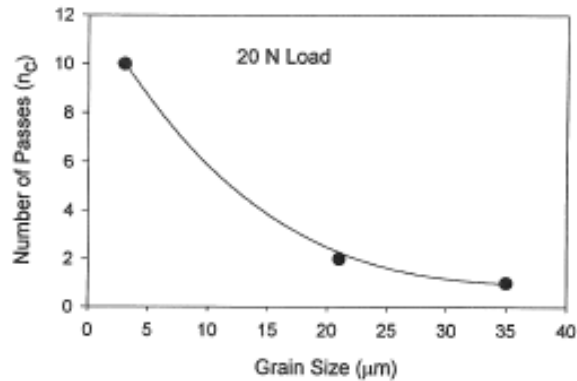
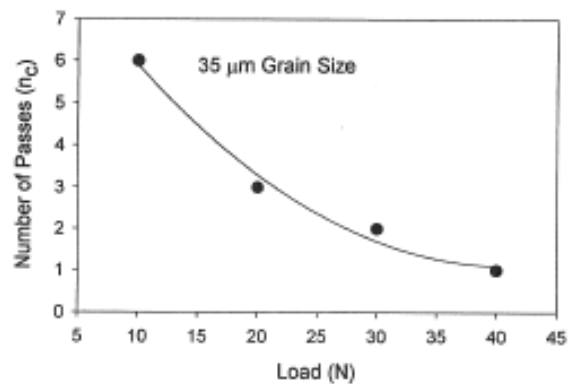


FIGURE 9 Volume removed per unit scratch length as a function of number of passes: (a) for three different grain sizes at 20 N; and (b) at different loads for the coarse grain alumina (35  $\mu\text{m}$ ). (From Ref. 35.)

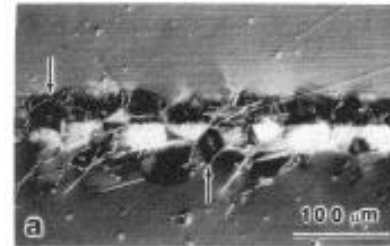
Efeito do tamanho de grão (35  $\mu\text{m}$ ) e Carga (20N)



(a)



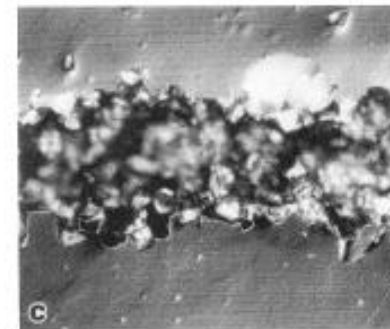
(b)



1 passo



2 passos



5 passos

for  
FIGURE 11 Optical micrographs with Nomarski illumination showing scratches in coarse-grain alumina (35  $\mu\text{m}$ ) at 20 N after different passes: (a) one; (b) two; and (c) five. Arrows point to pits produced by grain dislodgement. (From Ref. 35.)

Efeito do (a) tamanho de grão e b) carga sobre o número crítico de passos para início da microfatura em alumina

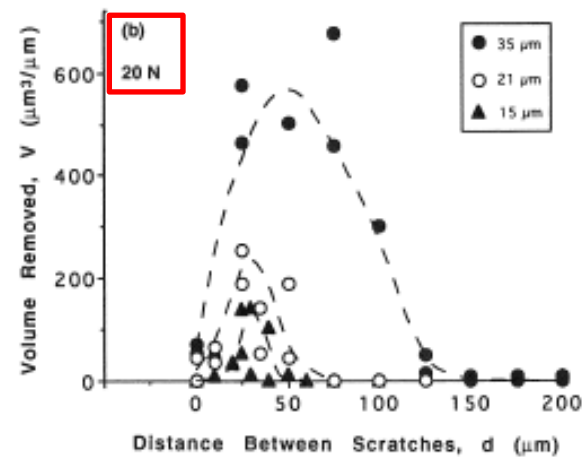
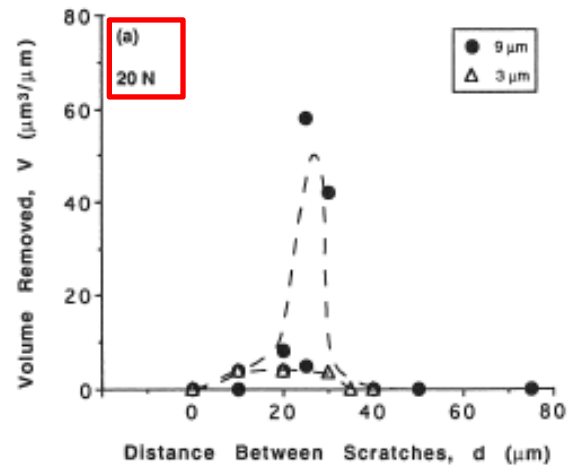


FIGURE 14 Total volume of material removed per unit length as a function of separation distance between two parallel scratches at 20 N, for aluminas with different grain sizes (a) 3 and 9  $\mu\text{m}$ ; and (b) 15, 21, and 35  $\mu\text{m}$  (From Ref. 39.)

Influência entre a distância entre riscos e tamanho de grão sobre o volume removido

## Influência entre a distância entre riscos e tamanho de grão sobre o volume removido

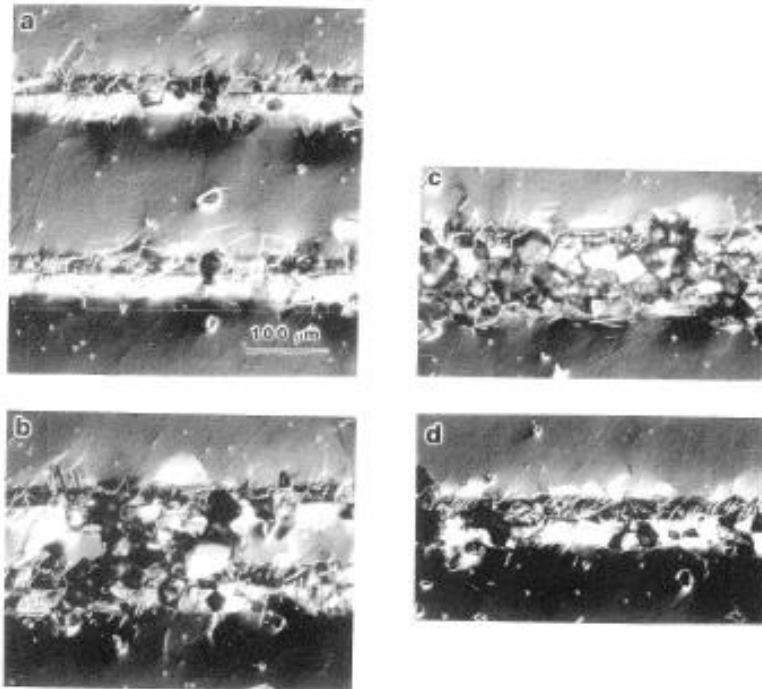


FIGURE 15 Optical micrographs showing parallel scratches in a coarse-grain alumina (35  $\mu\text{m}$ ) at 20 N and different separation distances: (a) 200  $\mu\text{m}$ ; (b) 100  $\mu\text{m}$ ; (c) 50  $\mu\text{m}$ , and (d) 0  $\mu\text{m}$ . Sliding direction is left to right. (From Ref. 39.)

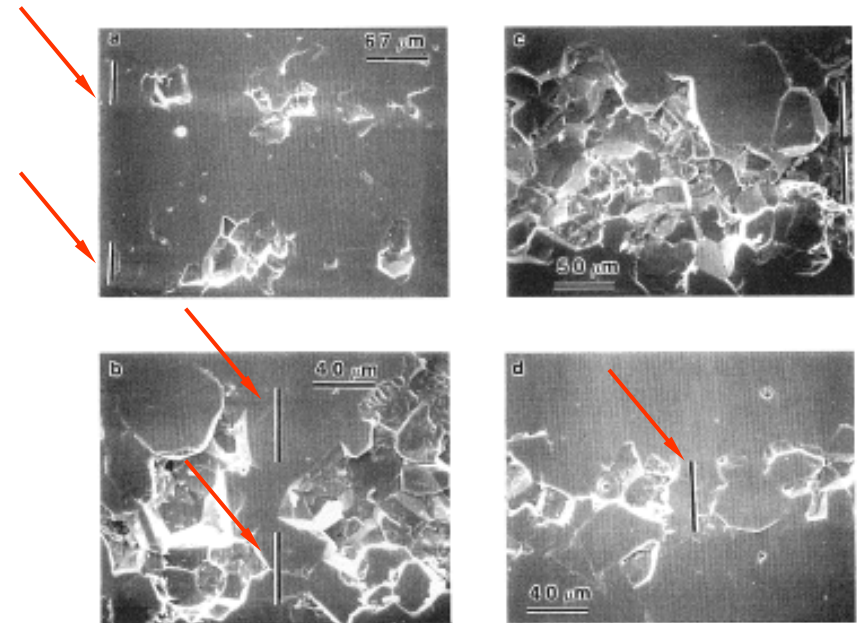


FIGURE 16 SEM micrographs corresponding to Fig. 15 showing grain dislodgement as the main material removal mechanism. Sliding direction is horizontal, and vertical bars indicate scratch positions and impression widths. (From Ref. 39.)

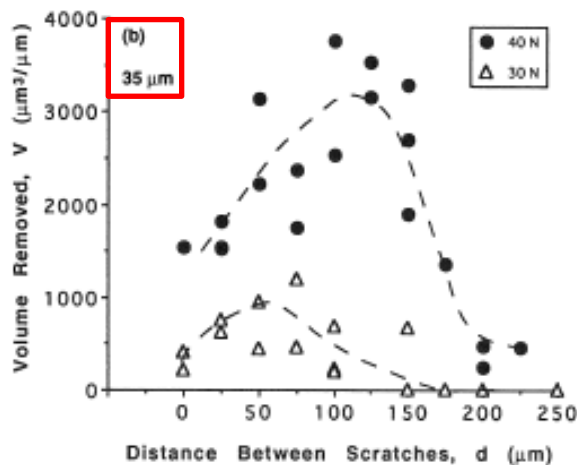
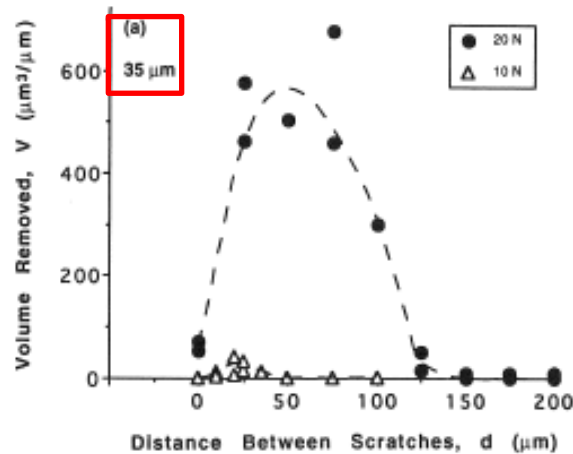
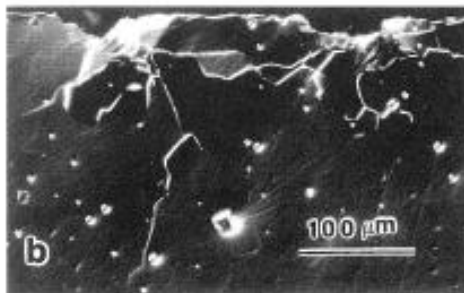
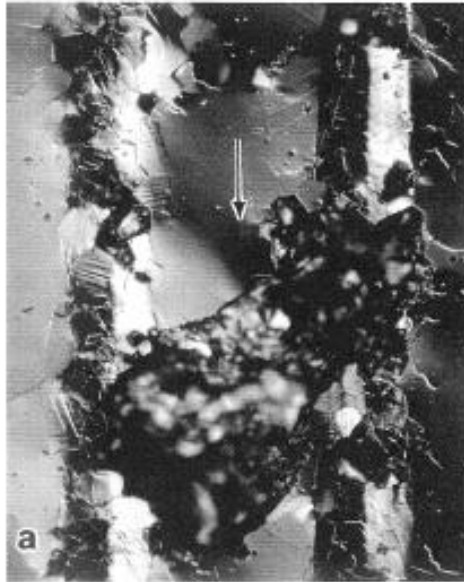


FIGURE 17 Total volume of material removed per unit length in the coarse-grain alumina ( $35 \mu\text{m}$ ) as a function of separation distance at (a) 10 and 20 N; and (b) 30 and 40 N. (From Ref. 39.)

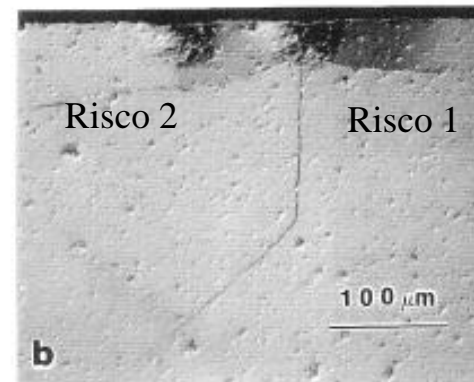
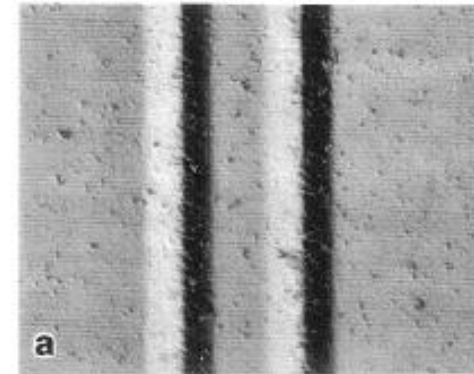
Influência entre a distância entre riscos e tamanho de grão ( $35 \mu\text{m}$ ) sobre o volume removido para diferentes cargas





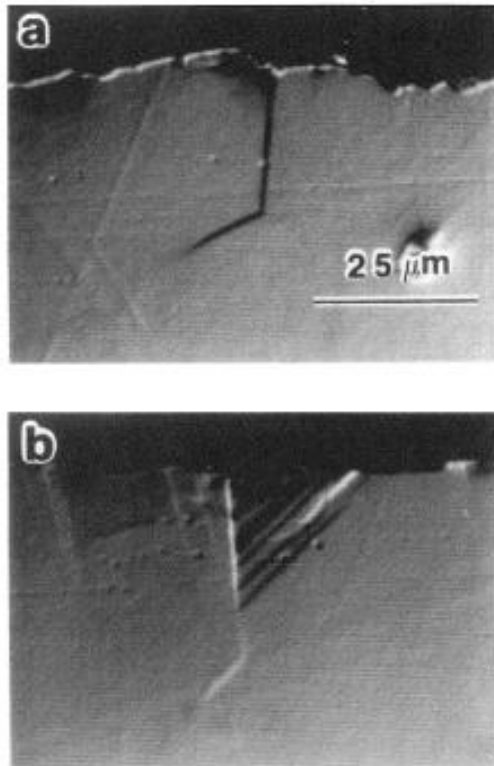
**FIGURE 18** Extensive microfracture damage and material removal in the coarse-grain alumina at 40 N and a separation distance of 200  $\mu\text{m}$ : (a) surface view; and (b) section view. Arrow in (a) indicates sliding direction. (From Ref. 39.)

35  $\mu\text{m}$ ; 200  $\mu\text{m}$  e 40 N

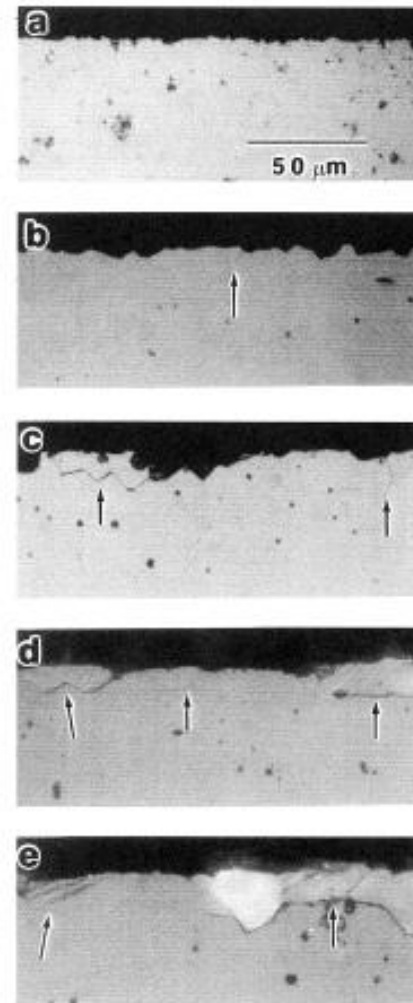


**FIGURE 19** Two parallel scratches in the fine-grain alumina at a separation distance of 100  $\mu\text{m}$  and 40 N load: (a) surface view; and (b) section view. Subsurface damage pattern in (b) shows interaction between the two scratches; surface features in (a) do not show any sign of interaction. (From Ref. 39.)

3  $\mu\text{m}$ ; 100  $\mu\text{m}$  e 40 N



**FIGURE 20** Section views of subsurface grinding damage in a coarse-grain alumina ( $35\ \mu\text{m}$ ) at a depth of cut of  $40\ \mu\text{m}$  showing (a) grain boundary microcracks; and (b) microcracks associated with intragrain shear faults. (From Ref. 40.)



**FIGURE 21** Optical micrographs with Nomarski illumination showing section views of subsurface grinding damage in aluminas with grain sizes of (a)  $3\ \mu\text{m}$ ; (b)  $9\ \mu\text{m}$ ; (c)  $15\ \mu\text{m}$ ; (d)  $21\ \mu\text{m}$ ; and (e)  $35\ \mu\text{m}$ . Depth of cut was  $40\ \mu\text{m}$ . (From Ref. 40.)

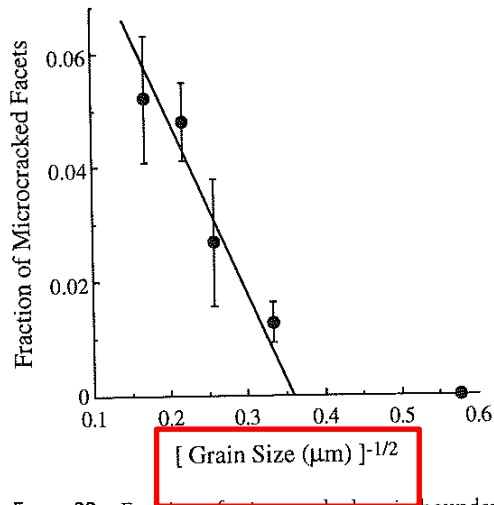


FIGURE 22 Fraction of microcracked grain boundary facets estimated from the section views as a function of square root of grain size. Each data point is the average of five measurements, and error bars indicate  $\pm 1$  standard deviation. (From Ref. 40.)

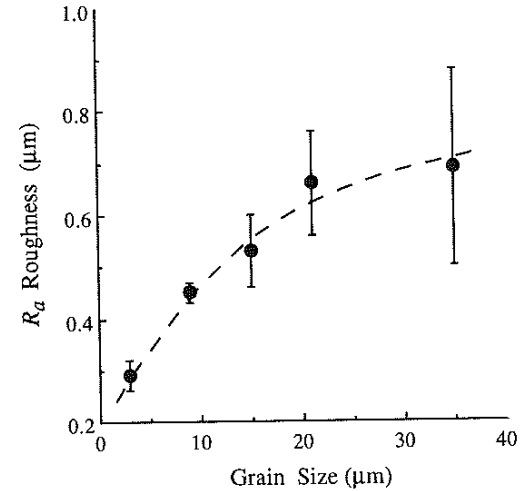
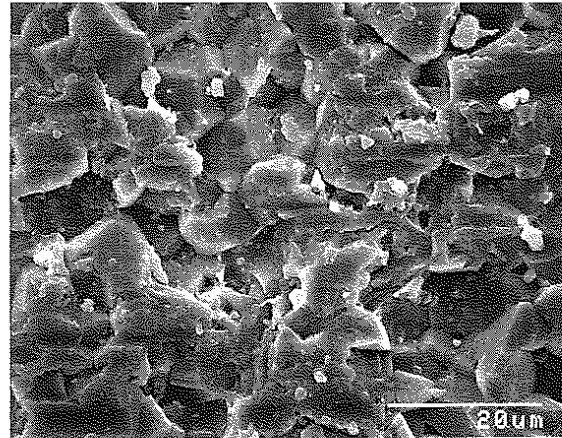
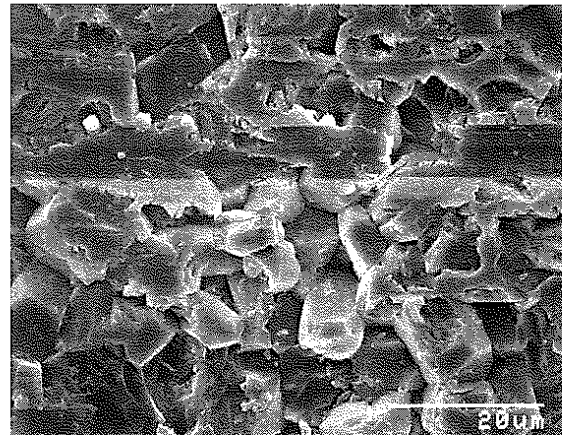


FIGURE 23 Average surface roughness of alumina as a function of grain size at a depth of cut of  $40 \mu\text{m}$ . Each data point is the average of six traces at different positions on the ground surface, with each trace about 2 mm in length. Error bars are standard deviations of measurements. (From Ref. 40.)

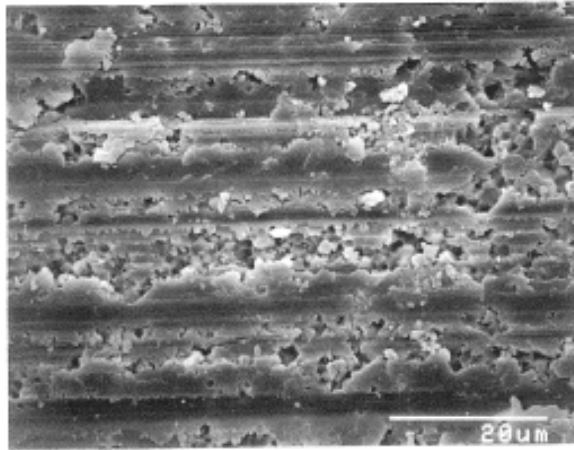


(a)

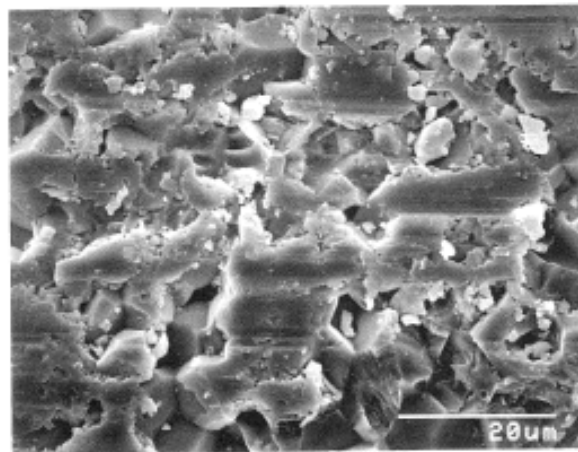


(b)

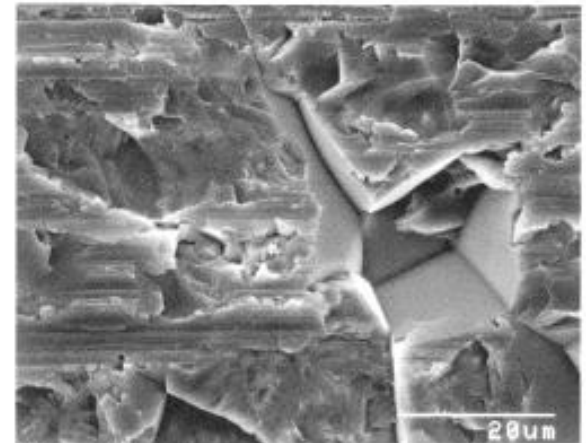
FIGURE 24 Surface structure of ground alumina ( $9\ \mu\text{m}$  grain size) using an 80-grit wheel at two different depths of cut: (a)  $2.5\ \mu\text{m}$ ; and (b)  $100\ \mu\text{m}$ .



(a)



(b)

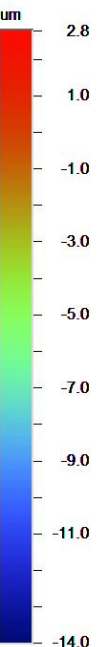
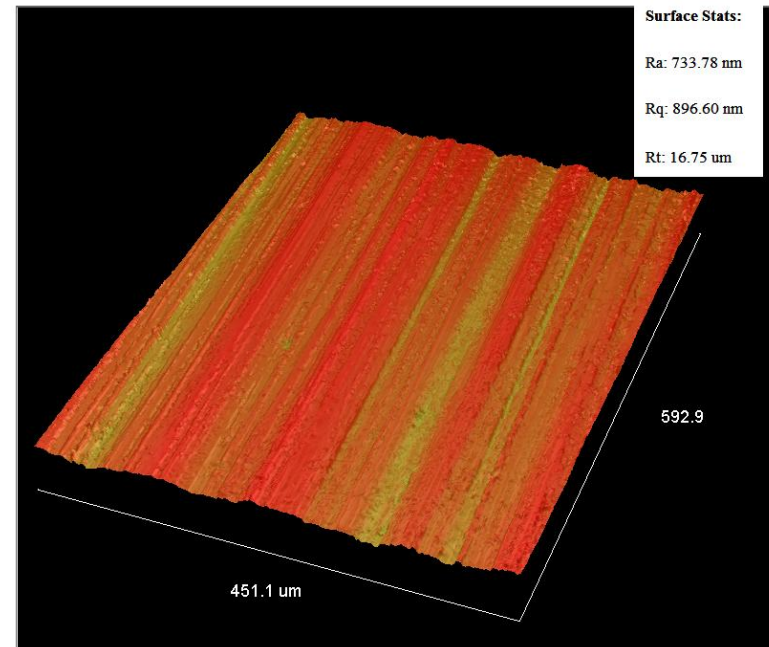
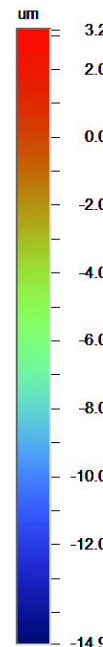
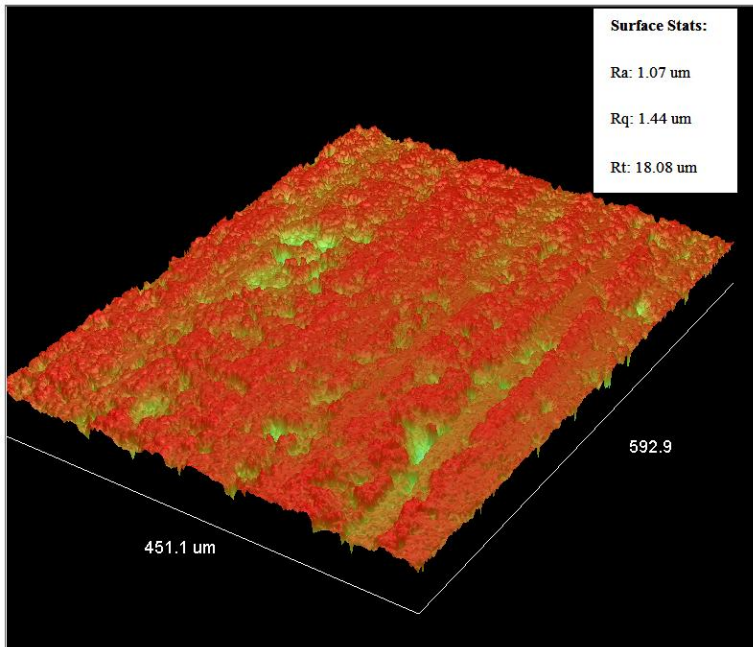


(c)

FIGURE 25 Continued.

FIGURE 25 Surface structure alumina with three different grain sizes: (a) 3  $\mu\text{m}$ ; (b) 9  $\mu\text{m}$ ; and (c) 35  $\mu\text{m}$ , ground with 320-grit wheel at 40  $\mu\text{m}$  depth of cut.

$ap = 50 \mu\text{m}$

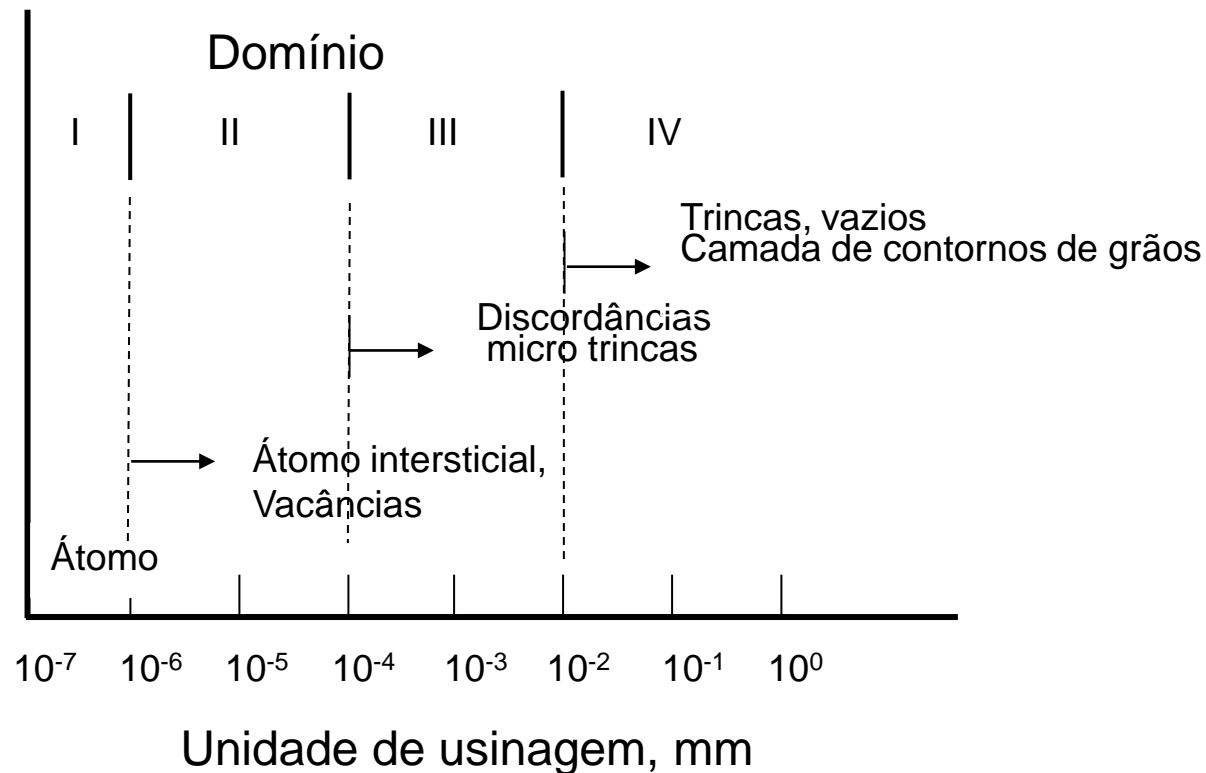


8YCZ

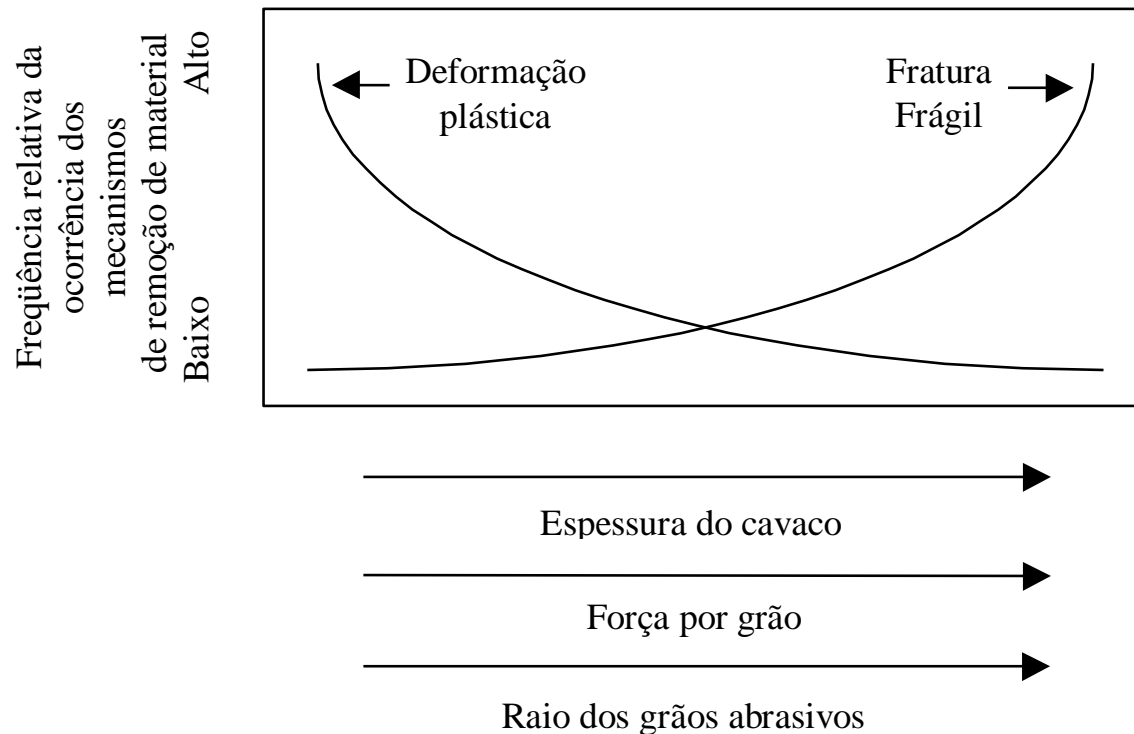
3YTZ

## Mecanismos de remoção em retificação

Fatores que afetam a fratura de materiais (Yoshikawa 1967)



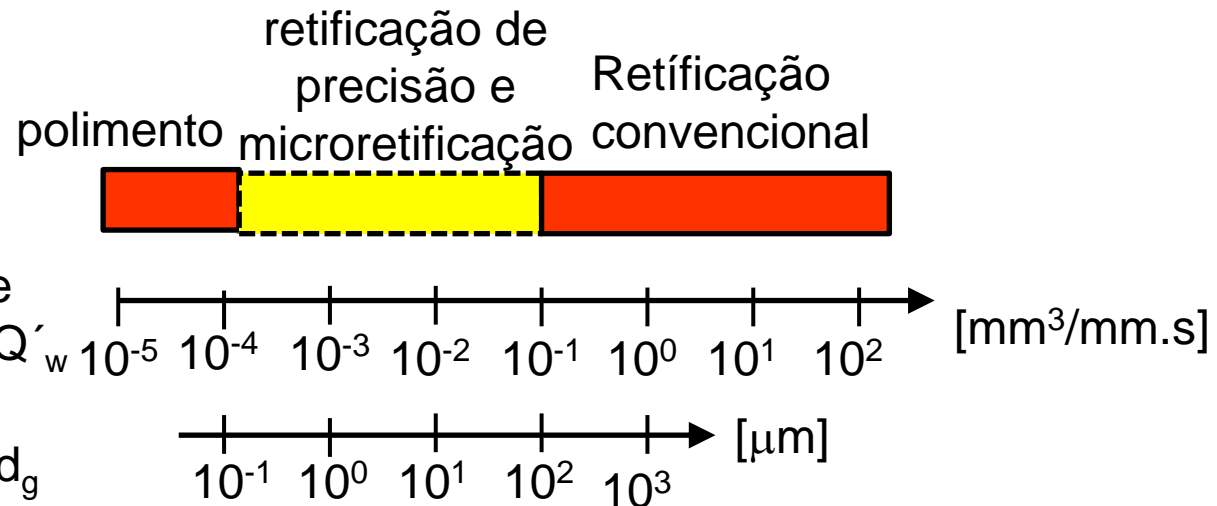
## Mecanismos e variáveis que controlam o processo de retificação de cerâmica (Subramanian, 1997).





## Retificação de Ultraprecisão

Aplicada principalmente na fabricação de componentes ópticos a partir de materiais não metálicos



Classificação de precisão e microretificação com relação ao polimento e retificação convencional baseado em taxa de remoção de material e tamanho do grão.

# PROCESSOS DE REMOÇÃO MATERIAL

## Cerâmica

Quatro Mecanismos:

- 1) Arrancamento de grãos  $\Rightarrow$  Retificação
- 2) Pulverização  $\Rightarrow$  Grãos abrasivos
- 3) Lascamento  $\Rightarrow$  Usinagem abrasiva
- 4) Remoção de cavaco Dúctil: Função da dimensão da área do cavaco

## PROCESSOS DE REMOÇÃO MATERIAL

$$F_{a_1} = \beta_1 H \left( \frac{v_w}{v_s} \right) a_e$$

Micro corte

$$F_{a_2} = \beta_2 \left( \frac{K^{1/2} H}{E^{2/5}} \right) \left( \frac{v_w}{v_s} \right)^{3/4} a_e$$

Desalojamento de grão

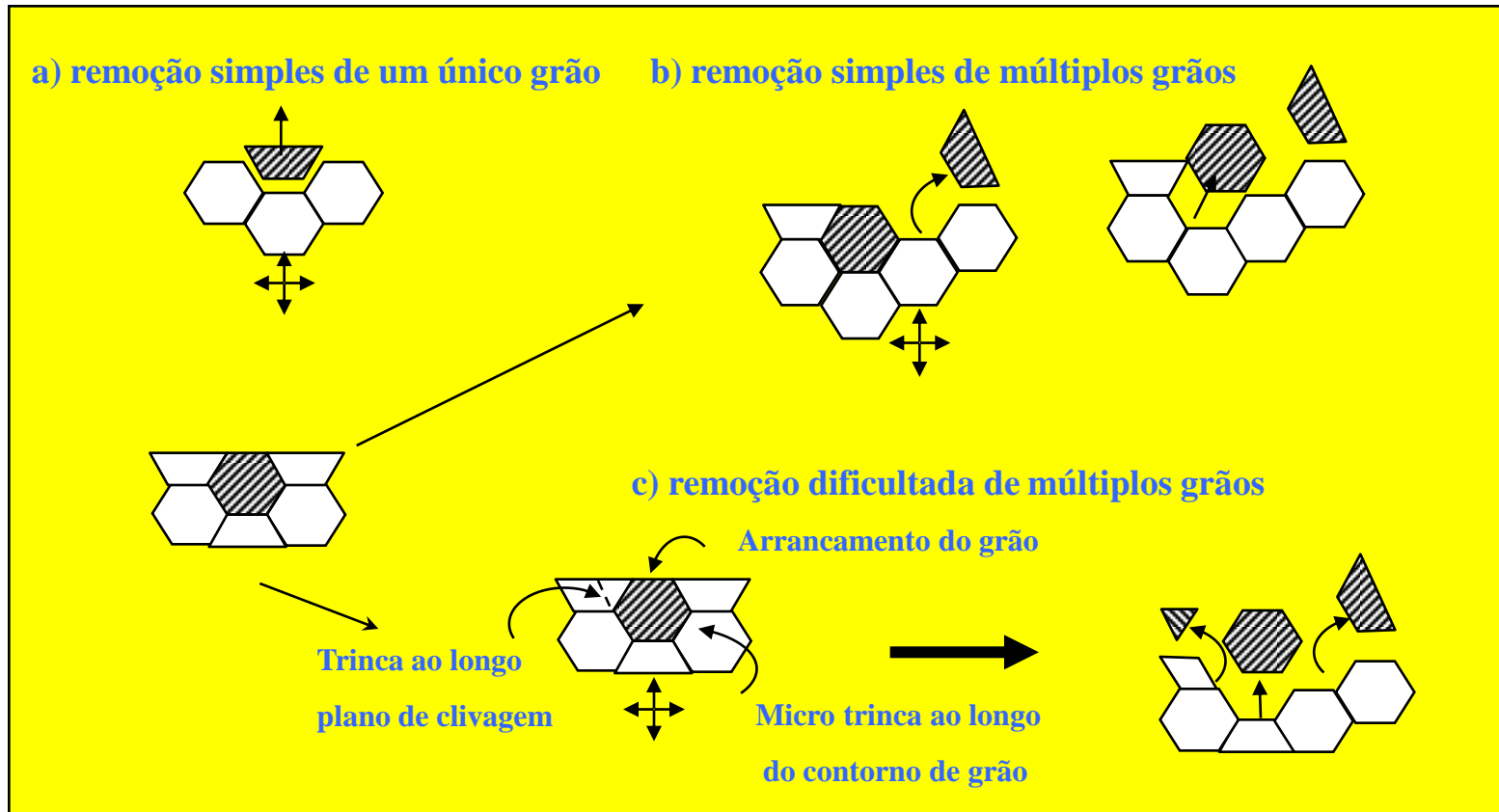
$$F_{a_3} = \beta_3 \left( K^{4/9} \frac{H^{4/5}}{E^{2/3}} \right) \left( \frac{v_w}{v_s} \right) a_e$$

Lascamento por trincas laterais

onde  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$  são constantes relacionadas à topografia de rebolo,  $H$ ,  $K$  e  $E$  a dureza, a tenacidade e o módulo elástico do material usinado, respectivamente, e  $V_w$ ,  $v_s$  e  $a_e$  são as condições de retificação, nominalmente a velocidade da peça, velocidade do rebolo e profundidade de corte, respectivamente.

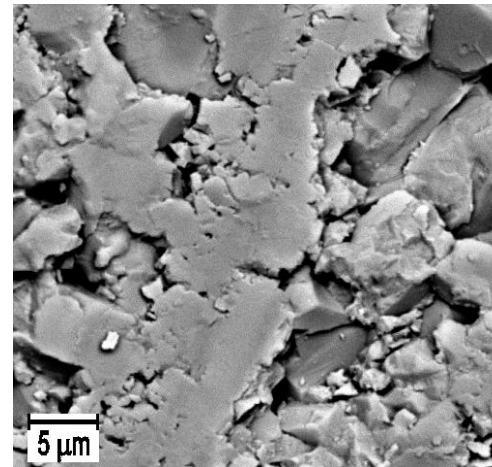
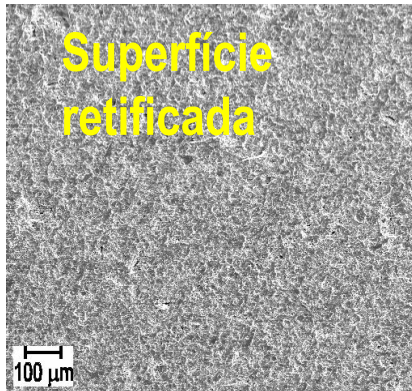
# 1. Arrancamento de grãos ⇒ Retificação

Ruff et al. (1995)

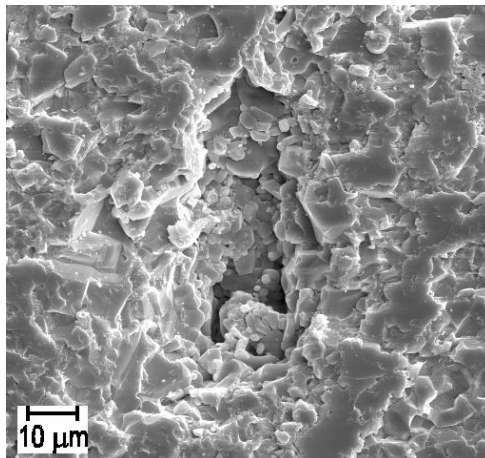


A.W. Ruff , H. Shin, C.J. Evans Damage processes in ceramics resulting from diamond tool indentation and scratching in various environments *Wear* 181-183 (1995) 551-562

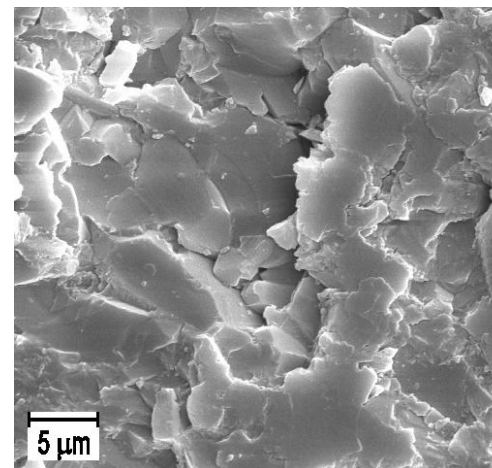
## 1. Arrancamento de grãos



Estrutura de material agregado, alumina 99,7%. 3000X, regiões onde a quebra e o arrancamento de grãos são evidentes, e uma região central que apresenta uma estrutura de material agregado



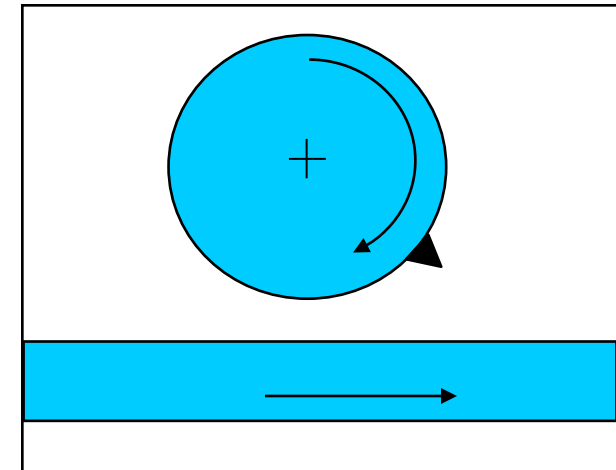
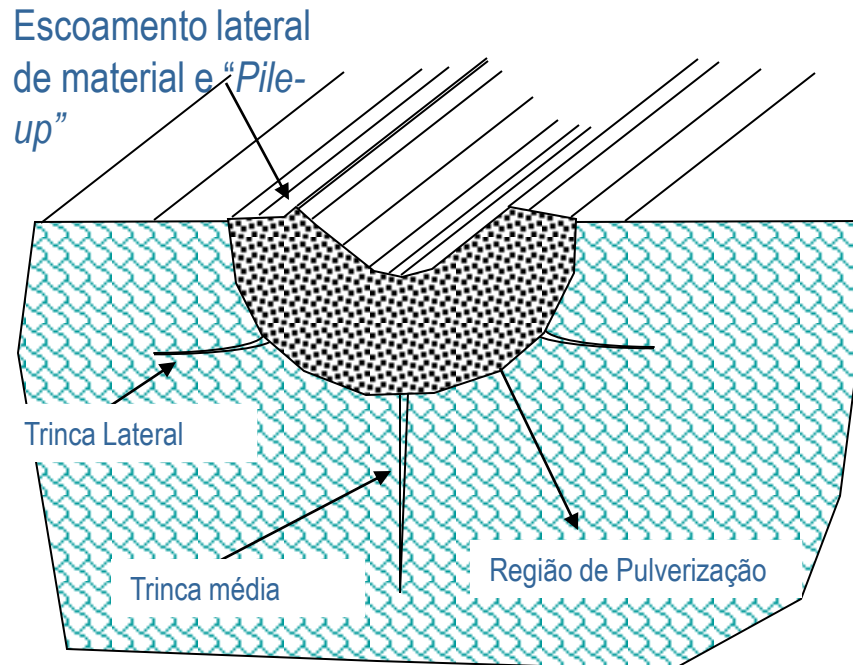
Cratera gerada pela retificação, alumina 99,7%. (1000X) estrutura ao lado de uma cratera, donde foi arrancada uma considerável quantidade de grãos cristalinos pela retificação



Estrutura de material agregado, alumina 99,7%. 3000X, grãos cristalinos quebrados e trincados ao redor da estrutura de material agregado que está numa região mais elevada que os grãos cristalinos quebrados

Regiani, I., Usinagem pro abrasão de cerâmicas avançadas, Dissertação de Mestrado, SEM- EESC-USP, 158p., 1997.

## 2. Pulverização



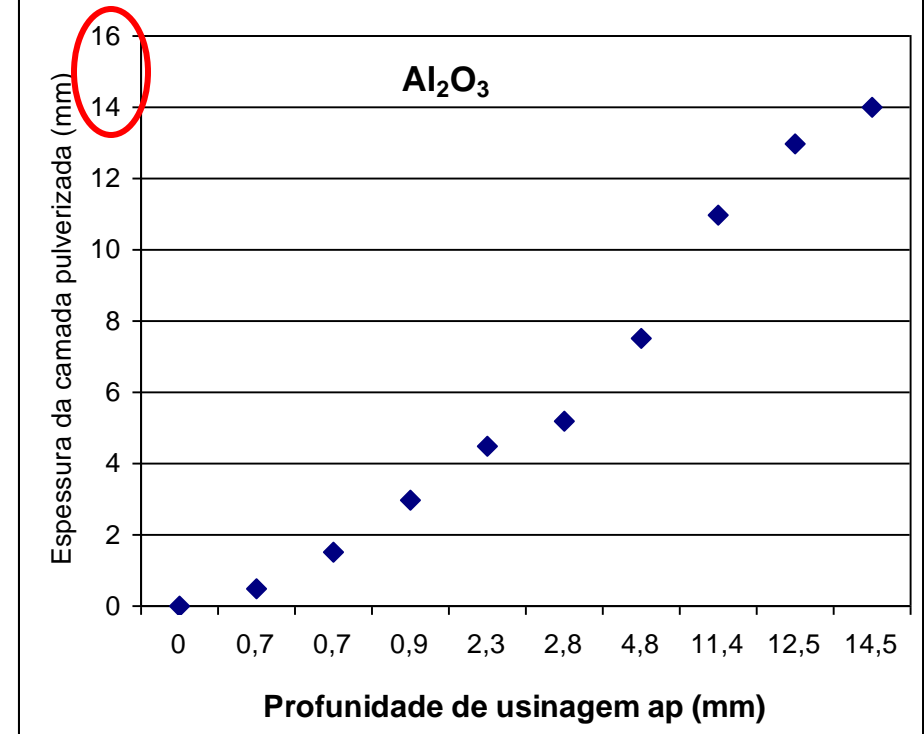
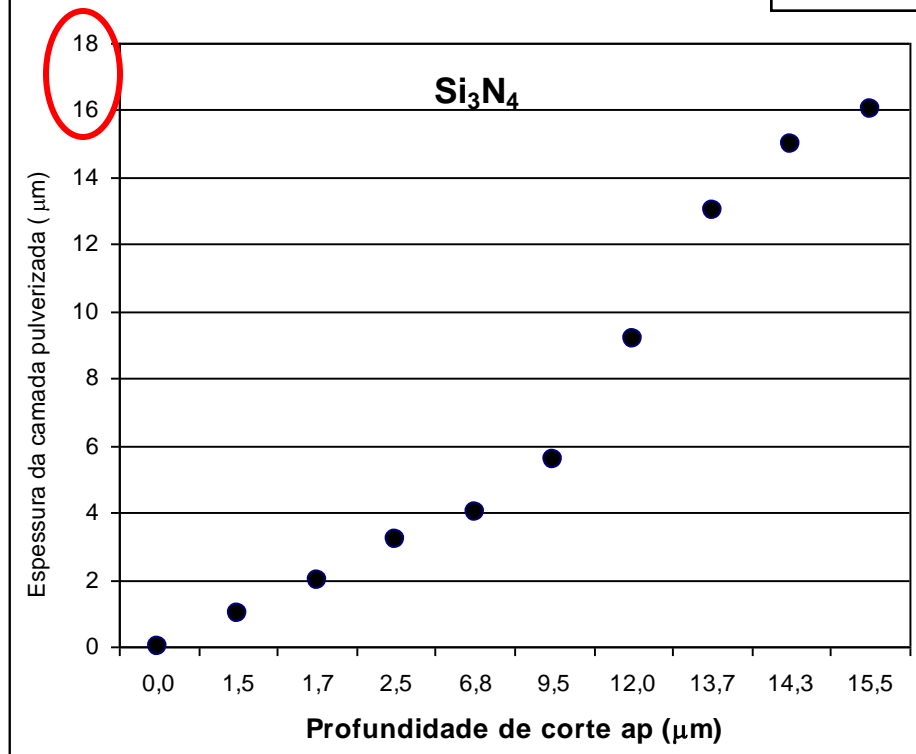
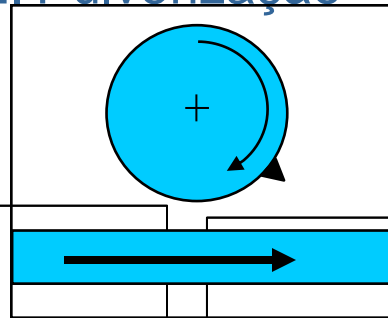
Raio de Ponta do Grão: 1  $\mu\text{m}$

A pulverização já foi observada em retificação com ponta única e com múltiplas pontas

A pulverização do material ocorre quando: *grãos de cerâmica com tamanhos micrométricos são triturados na região de contato de corte, formando assim, pós com dimensões submicrométricas ou menores.*

## 2. Pulverização

Raio de Ponta do Grão:  $1 \mu\text{m}$

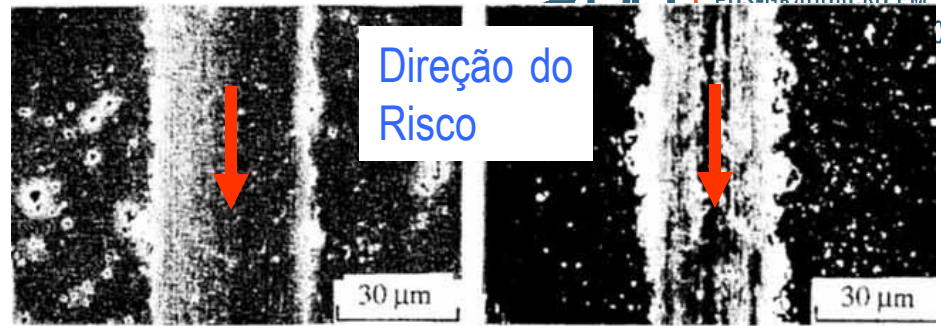
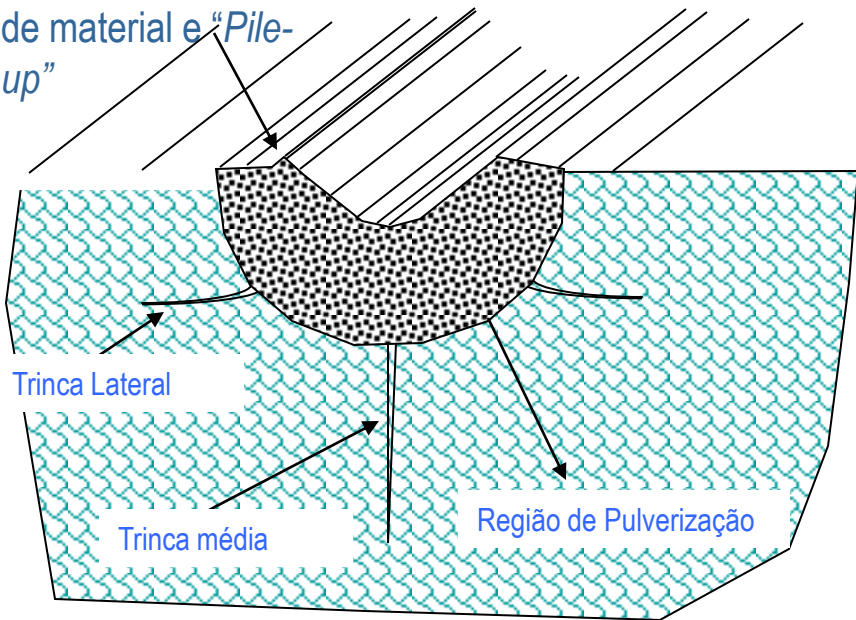


Correlação entre a espessura do regime de pulverização e a profundidade de usinagem do penetrador



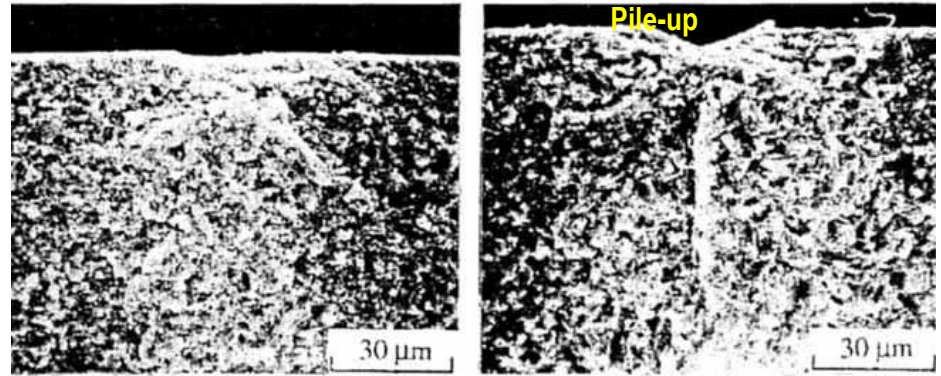
## 2. Pulverização

Escoamento lateral de material e "Pile-up"

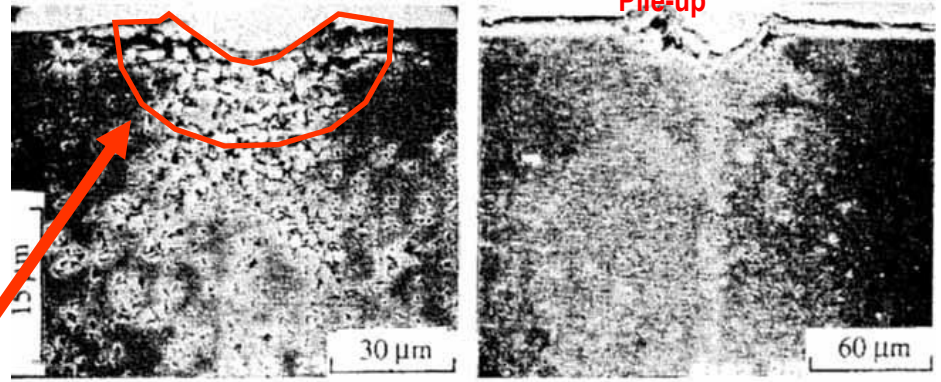


Direção do Risco

Surface observations



Observations prepared by the fracture technique



Observations prepared by the taper polishing technique

(a) Alumina (b) Silicon nitride

Observações por MEV da superfície e subsuperfície de alumina e nitreto de silício retificadas com ponta única.

Nenhuma trinca ou lascamento foram observadas a profundidades menores que a crítica (2,5 μm Si<sub>2</sub>N<sub>3</sub>, 2 μm para Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,5 μm para SiC)

Região pulverizada

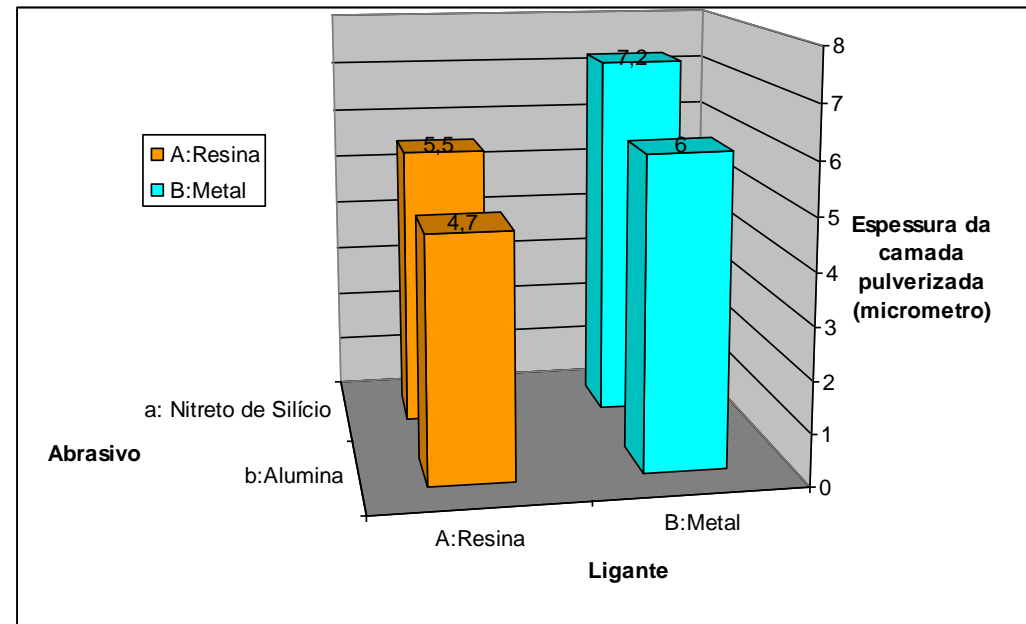
Zhang, B., Howes, D. Material removal in grinding ceramics. Annals of the CIRP, vol. 43(1):305-308, 1994.



## 2. Pulverização

Outro aspecto importante é a formação da pulverização e a diferença nos Material do ligante dos rebolos

Tipo de Ligante	Espessura da camada pulverizada
SD140-N75M (resinoide)	7,2 $\mu\text{m}$ (Nitreto de Silício)
SD140-N75M (metalico)	6 $\mu\text{m}$ (Nitreto de Silício)
SD140-N75M(resinoide)	5,5 $\mu\text{m}$ (Alumina)
SD140-N75M (metalico)	4,7 $\mu\text{m}$ (Alumina)



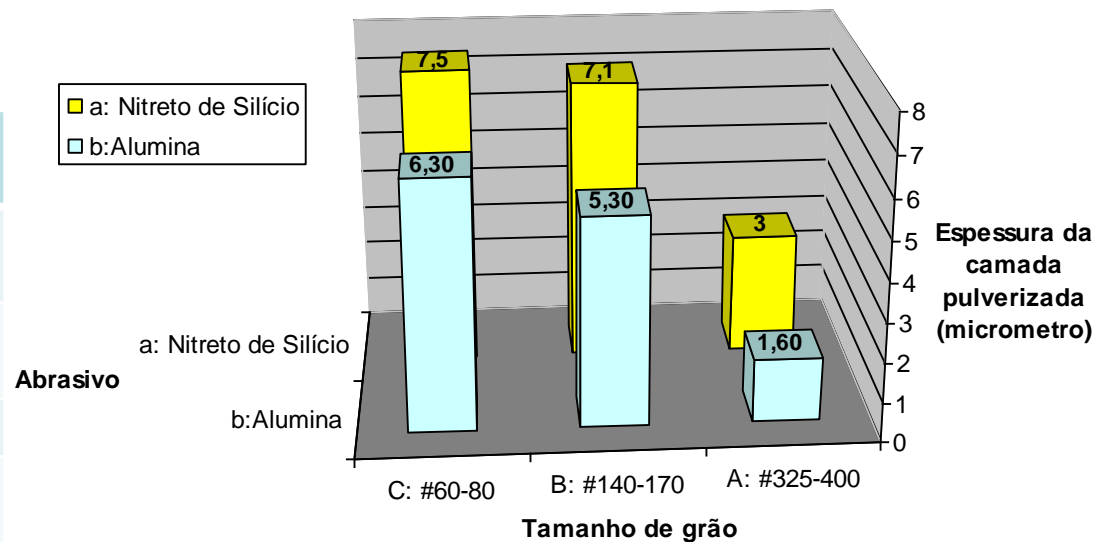
Variações da espessura da camada pulverizada com rebolos com diferentes ligantes

**Pergunta: Qual propriedade deve estar influenciando nessa diferença na camada pulverizada?**

## 2. Pulverização

Outro aspecto importante é a formação da pulverização e a diferença nos rebolos de diamante.

Tamanho do Grão (mesh sizes)	Espessura camada pulverizada
# 60-80	7,5 $\mu\text{m}$ (Nitreto de Silício)
#140-170	7,1 $\mu\text{m}$ (Nitreto de Silício)
#325-400	3 $\mu\text{m}$ (Nitreto de Silício)
# 60-80	6,3 $\mu\text{m}$ (Alumina)
#140-170	5,3 $\mu\text{m}$ (Alumina)
#325-400	1,6 $\mu\text{m}$ (Alumina)



Variações da espessura da camada pulverizada com rebolos de diamante com diferentes tamanhos de grão

**Pergunta: Qual propriedade deve estar influenciando nessa diferença na camada pulverizada?**

## 2. Pulverização

A dimensão dos pós é proporcional a profundidade de corte.

A região do empilhamento lateral (*pile-up*) pode ser avaliada através da relação:

$$e = p/d$$

onde  $e$  é coeficiente de *pile-up*,  $p$  é a altura do *pile-up* e  $d$  é profundidade de corte

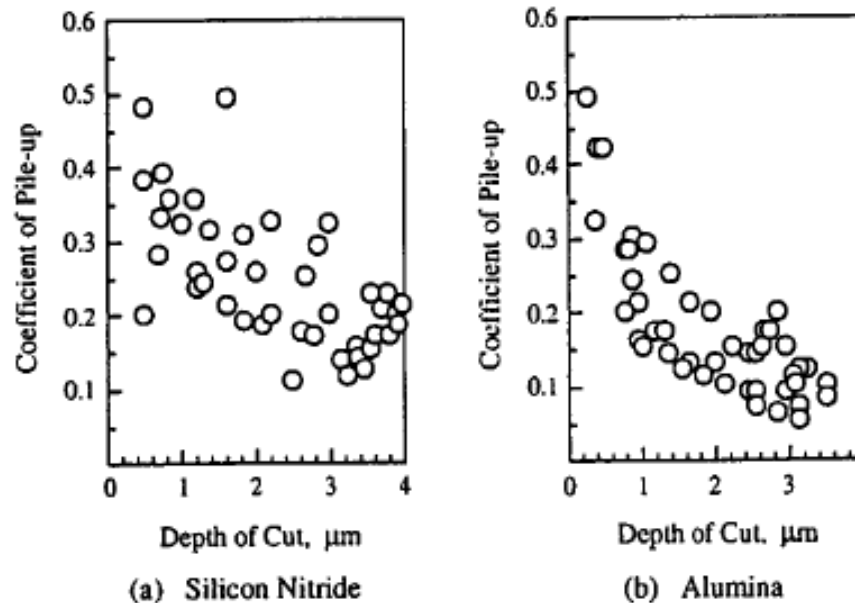


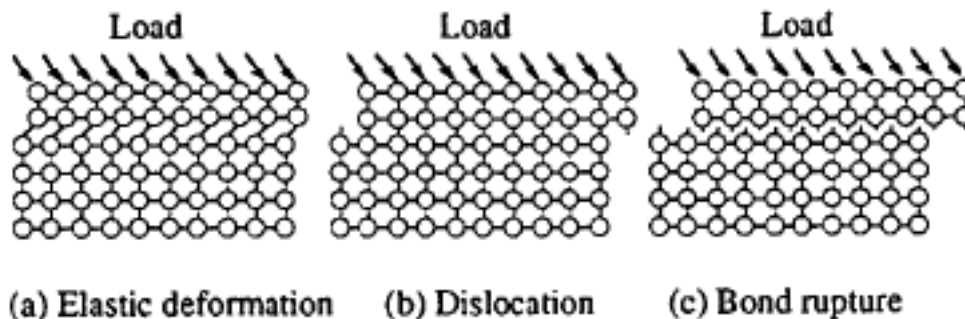
Fig. 9 Coefficient of pile-up vs. depth of cut

## 2. Pulverização

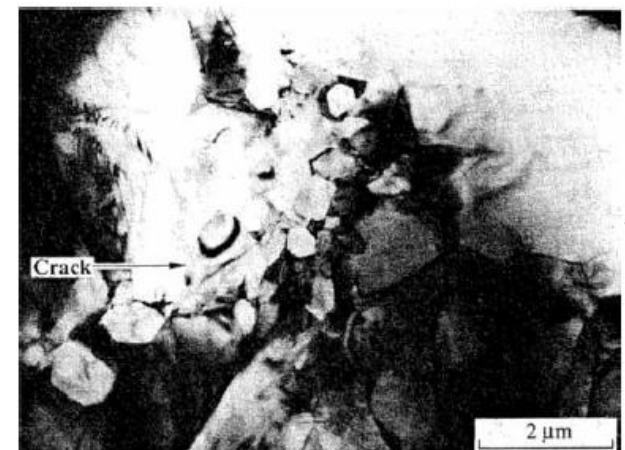
Como a pulverização é o estágio mais avançado do cisalhamento e quebra do material, a energia requerida para pulverização do material pode ser maior que a requerida para a fratura frágil ou a *deformação plástica*.

- 1) No primeiro estágio do stress do material, há distorção da rede cristalina ou deformação elástica (Fig.10a);
- 2) Com aumento da tensão de cisalhamento, o movimento de discordância inicia-se ao longo de certos planos de escorregamento;
- 3) Com o subsequente aumento da tensão de cisalhamento, a deformação não ocorre mais por movimento de discordâncias e a quebra de ligação ocorre, a qual resulta na pulverização do material da peça.

A tensão de cisalhamento causa a pulverização enquanto a pressão hidrostática recompacta o material triturado, gerando o regime de pulverização.

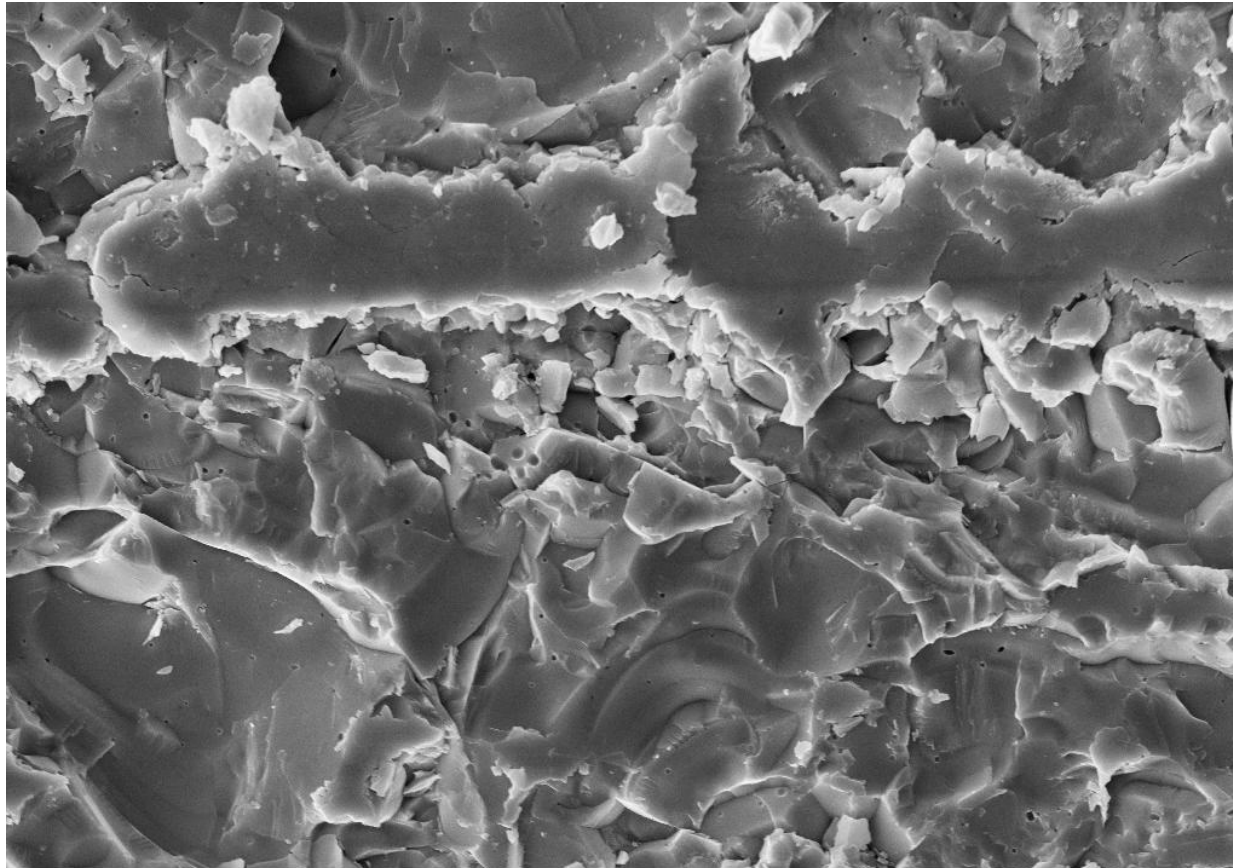


**Fig. 10** Progressive lattice deformations caused by grinding



**Fig. 5** Observation of grinding-disturbed layer of silicon nitride by TEM. A cluster of small grains is approximately 0.3  $\mu\text{m}$  in grain size. A crack is on a one-micron-sized grain.

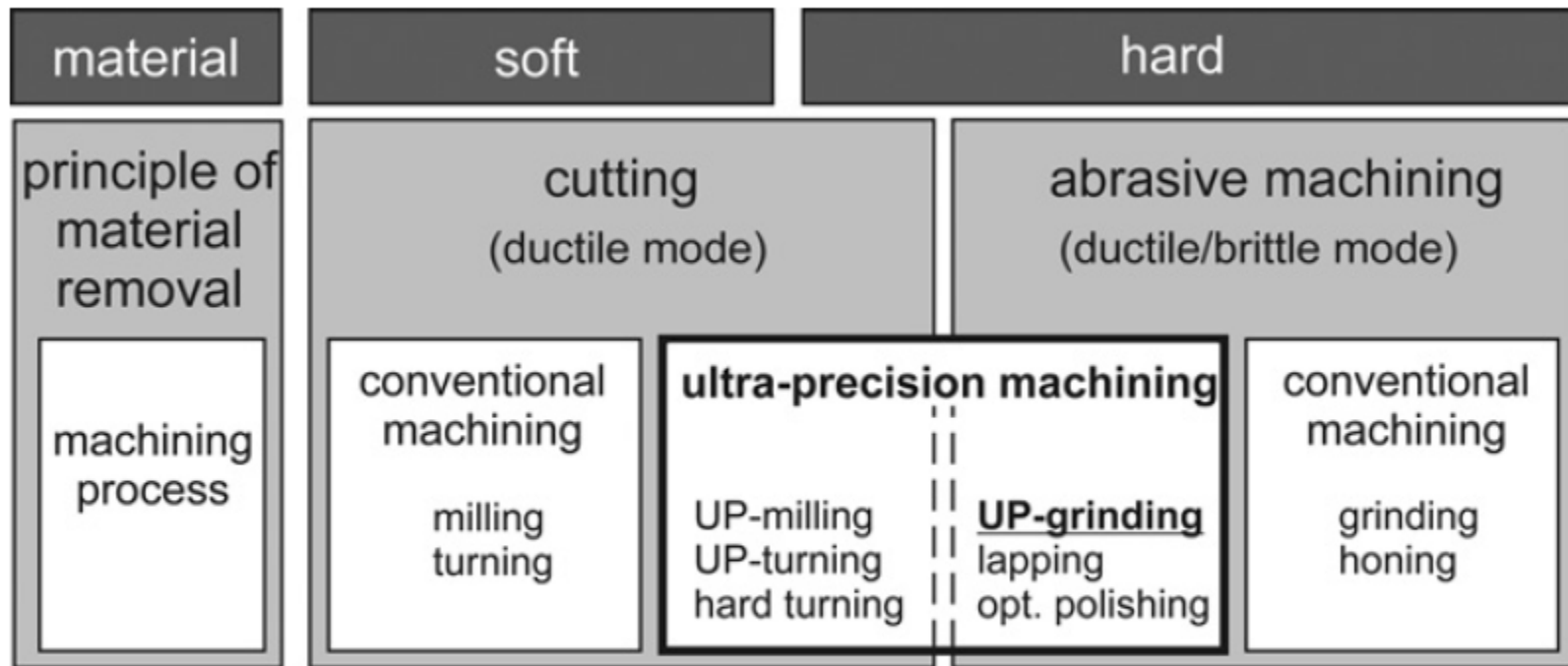
### 3) Lascamento $\Rightarrow$ Usinagem abrasiva



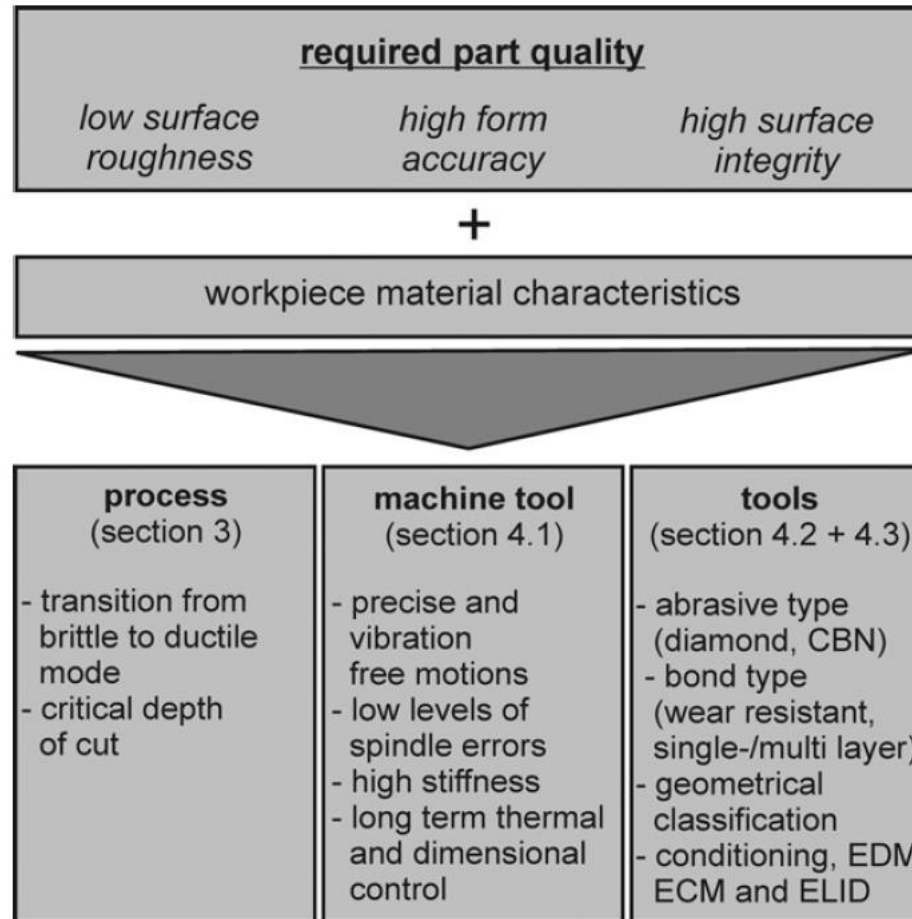
Zirconia estabilizada com  
Ytria fase cúbica

IQSC EHT=20.00 kV WD= 9 mm Mag= 5.00 K X Detector= SE1  
1µm H Photo No.=65 25-Apr-2013

# Retificação de Ultraprecisão



**Fig. 3.** Classification of ultra-precision machining depending on material, material removal mechanism, and process.



**Fig. 4.** Features entering the characterization of ultra-precision grinding.

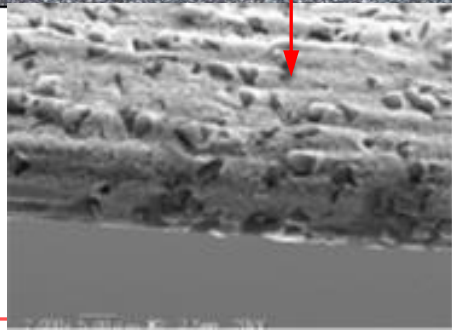
# Parâmetros do Rebolo

1. Material Abrasivo
2. Tamanho de grão
3. Grau do rebolo
4. Estrutura do rebolo
5. Material Ligante



# Rebolos de diamante

Rebolos de Disco



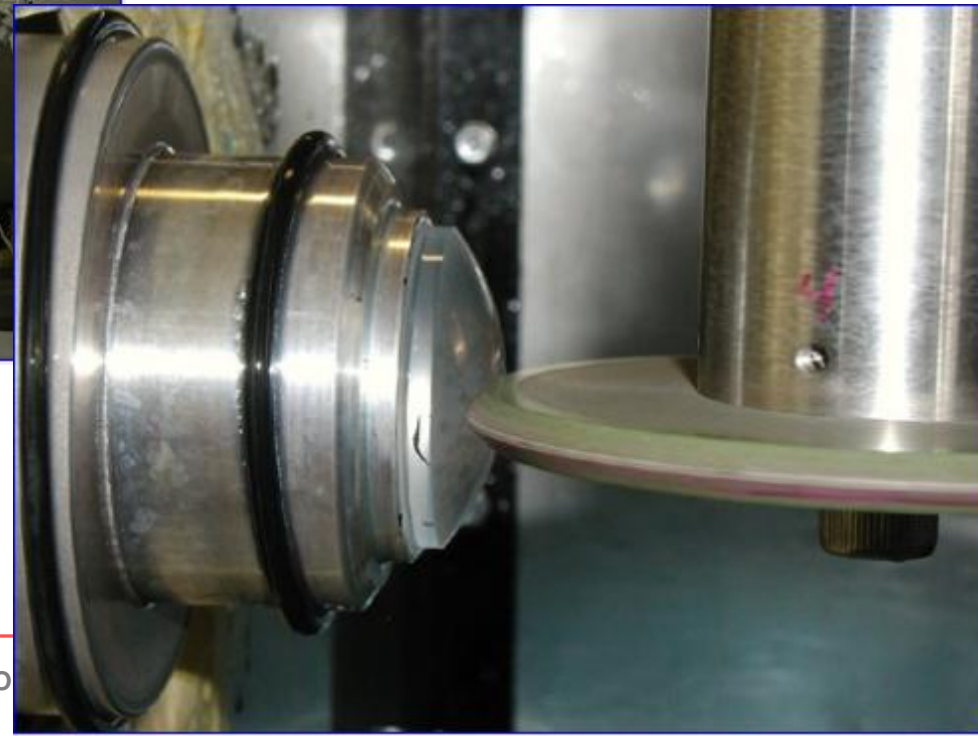
Rebolos de Copo



A camada de abrasivos ou os segmentos de abrasivos não são arranjados na direção radial ou no contorno do rebolo mas são ligados na direção axial.

# Rebolos de Disco

## Retificação vertical



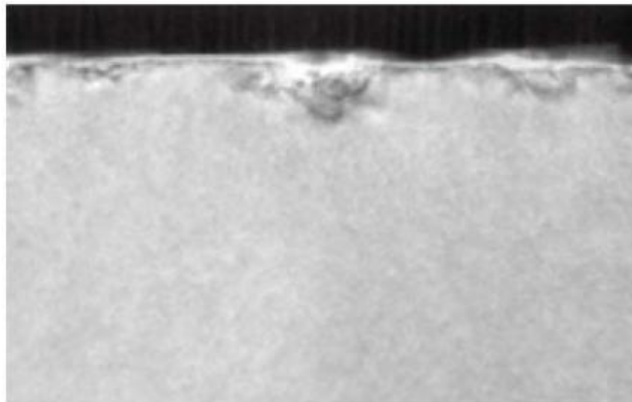
# Rebolos de copo

Rebolos de copo são considerados uma classe especial de ferramenta.

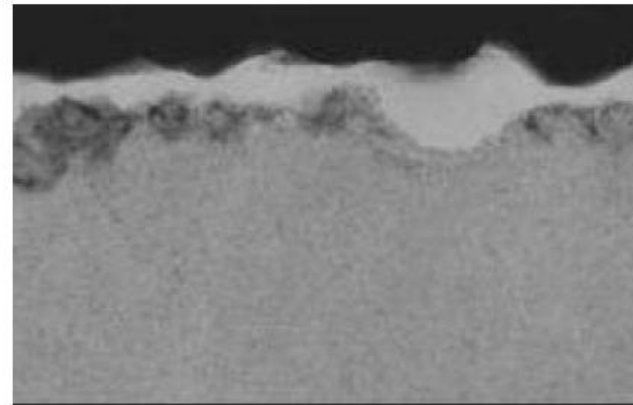
Rebolos de copo são usados em superfície planas muito finas (Wafer) em espelhos ou afinamento de espelhos (Fig.)

## ■ TEM comparison of wafer damage

The damaged layer of a wafer ground using UltraPoligrind is extremely small compared to that of a wafer ground using a #2000 grinding wheel.



**UltraPoligrind**



**Poligrind**

[1] Disco Corp. (2009) <http://www.disco.co.jp/eg/index.html>.

## 1. Material abrasivo: *Propriedades*

Pode ser natural ou sintético

Exemplo: *Diamante e CBN.*

O CBN apresenta estabilidade termo-química muito maior comparada ao diamante.

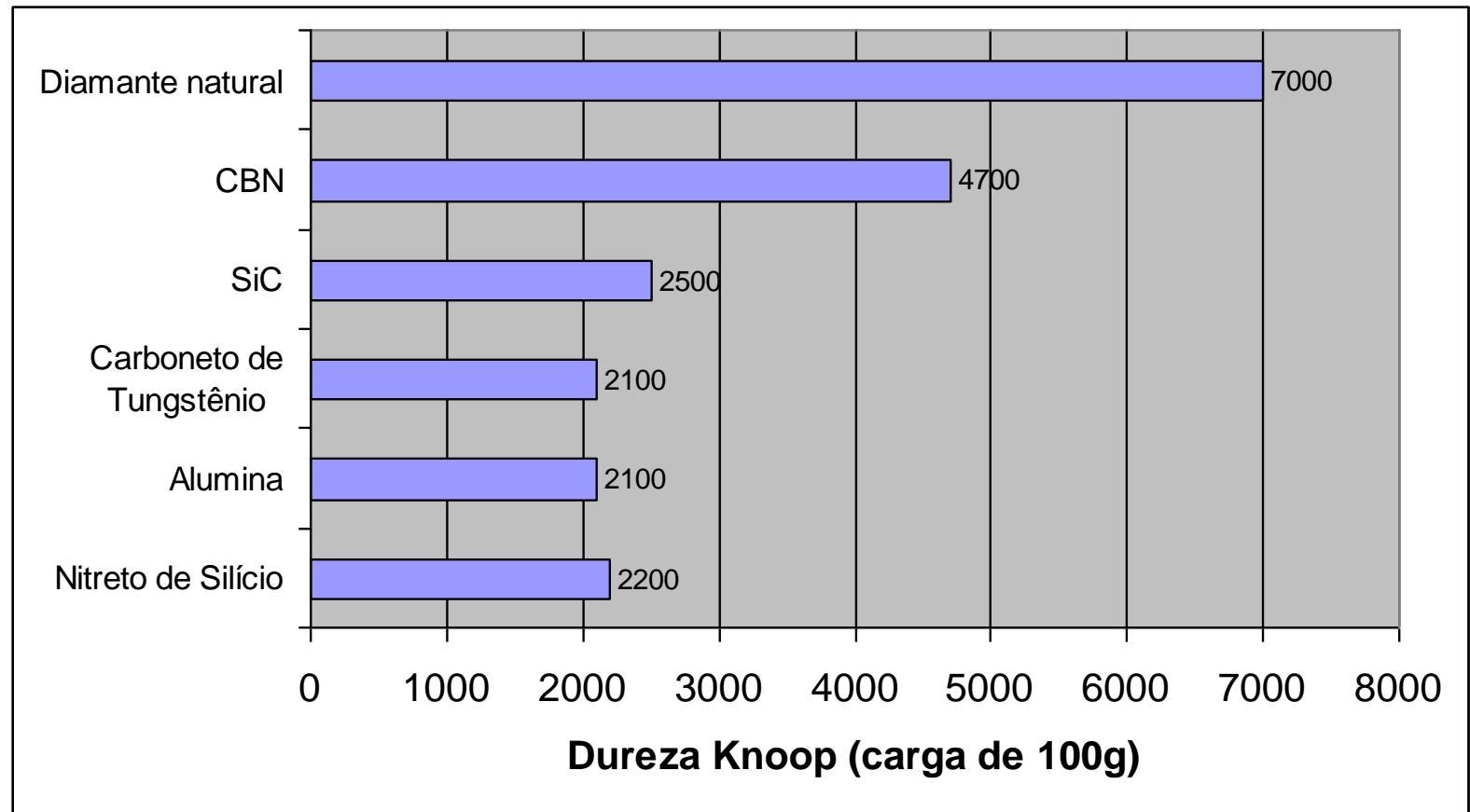
CBN-U o CBN ultrafino é um tipo especial de CBN.

Como propriedades essenciais aos materiais abrasivos temos:

- a) Alta dureza
- b) Tenacidade (*friabilidade*)
- c) Baixa afinidade química
- d) Resistência ao desgaste
- e) Baixo coeficiente de atrito

## 1a. Dureza dos Abrasivos

Materiais mais duros exigem tamanhos de grão menores para corte mais eficaz



Dureza Knoop para diversos tipos de materiais abrasivos (Callister p. 328)

## 1b. Tenacidade dos Abrasivos

Idealmente, uma única partícula abrasiva se re-afia pela quebra de sua aresta desgastada e expõe outra aresta na mesma partícula.

*Essa propriedade remete ao conceito de Friabilidade.*

**Friabilidade** – capacidade do grão abrasivo fraturar quando perde a afiação, de forma que novas arestas sejam expostas.

## 1c. Afinidade química

Outra propriedade importante é baixa afinidade química que deve ser considerado como critério na escolha de abrasivo dado o material a ser retificado

Tabela1. Afinidade química dos abrasivos (Leichter, 1975)

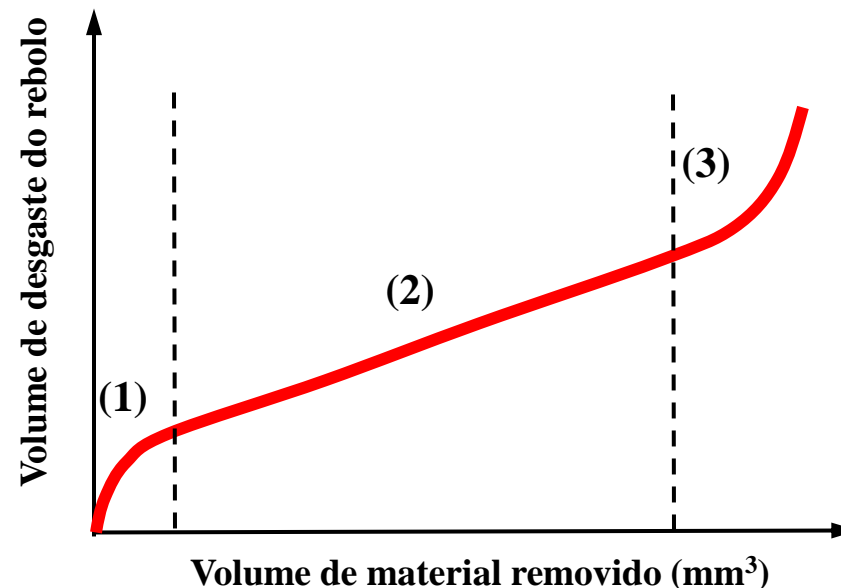
<b>Abrasivo</b>	<b>Estabilidade térmica até: (°C)</b>	<b>Afinidade química com</b>	<b>Adequado para</b>
<b>Óxido de Alumínio</b>	<b>2000</b>	Óxidos Vidros	Aços de todas as qualidades
<b>CBN</b>	<b>1370</b>	Cerâmicas Rochas	
<b>Carboneto de Silício</b>	<b>1300</b>	Materiais que assimilam carbono	Aços com carbono saturado, ferro fundido,
<b>Diamante</b>	<b>900</b>	Ex: aço de baixo carbono	óxidos (vidro, cerâmica, Cermets, semicondutores etc.)



## 1d. Resistência ao desgaste

O desgaste de rebolo é expresso como perda volumétrica de material.  
A agressividade do rebolo refere-se a perda de afiação decorrente do arredondamento das arestas do rebolo

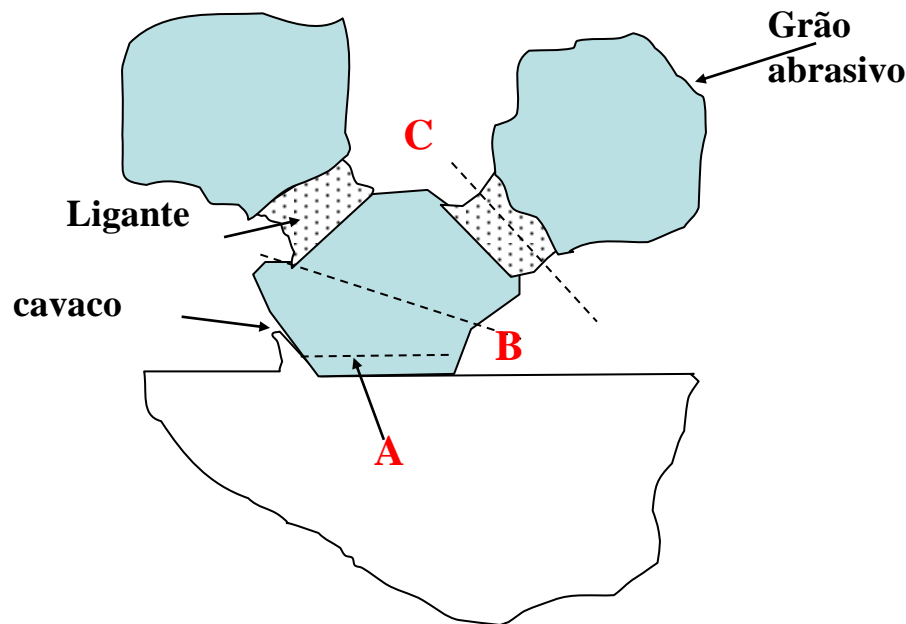
Curva típica do desgaste do rebolo.



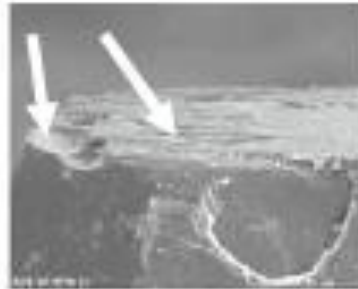
O desgaste é lançado no gráfico como função do volume removido de material, ao invés de ser em função do tempo.

## 1d. Resistência ao desgaste

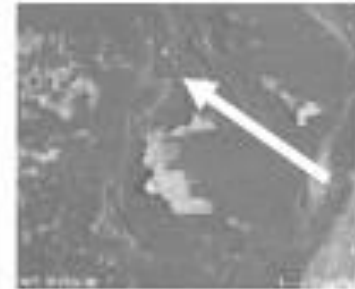
- A. **Attrition** – Causado por mecanismos similares entre si: atrito, difusão e reações químicas
- B. **Fratura de grão – friabilidade!!!!**
- C. **Fratura do ligante** – depende do grau do rebolo – grãos se desgastam por *attrition* e a força aumenta muito



abrasion and small  
grit flaking



crack  
initiation



material  
adhesion



chip  
adhesion



grit  
breakage



micro-breakage



## 1d. Resistência ao desgaste

Aplicação de coberturas protetoras em grãos de diamante que melhoram a razão entre desgaste e volume removido e reduz quebra dos grãos durante o processo [1].

Grãos de diamante dopados com Boro elevam a temperatura de oxidação em 200K comparativamente a grãos convencionais[2].

Tipo especial de abrasivo é o filme de diamante policristalino depositado pelo processo CVD (Chemical Vapor Deposition)

Com arestas afiadas com dimensões micrométricas de grãos que são usados em ferramentas tipo ponta montadas [3]. Denominados como *bondless diamond grinding wheels* [4].

1. Ihara E (2005) Metal-coated Abrasives, Grinding Wheel Using Metal-coated Abrasives and Method of Producing Metal-coated Abrasives. US Patent 20050129975.
2. Iwai M, Nakagawa K, Sano S, Tanaka K, Uematsu T, Mei W, Suzuki K (2005) A New Diamond Wheel Containing Boron Doped Diamond Abrasives Enabling Electrically Conductive Cutting Edge and High Thermal Stability. Key Engineering Materials 291(292):57–62.
3. Gäbler J, Schafer L, Menze B, Hoffmeister HW (2003) Micro Abrasive Pencils with CVD Diamond Coating. Diamond and Rel. Mat. 12:707–710.
4. Venkatesh VC, Izman S, Vichare PS, Mon TT, Murugan S (2005) The Novel Bondless Wheel, Spherical Glass Chips and a New Method of Aspheric Generation. Journal of Materials Processing Technology 167:184–190.





- Para retificação de ultraprecisão: Ligantes a base de resina usados em rebolos usam resina epóxi ou poliéster.
- Permitem obtenção de superfície bem acabadas com acabamento fino como de polimento em *wafers* de Si.
- Resina de Poliuretano é aplicada quando é necessário o abrasivo fixo com bastante elasticidade [1].
- Ligante vitrificado tem estrutura vítrea e são fabricados a altas temperaturas a partir de fluxos minerais, como feldspatos , argilas de queima , fritas de vidro e fluxos químicos [2].
- Aplicação de ligante de resina e vítreo é para retificação de wafer de Si.
- Ligante vítrep tem alta resistência para retenção de grão e são fáceis de dresser: módulo elástico 4x maior do que o resinoide.

[1] Liu JH, Pei ZJ, Fisher GR (2007) Grinding Wheels for Manufacturing of Silicon Wafers: A Literature Review. International Journal of Machine Tools and Manufacture 47:1–13.

[2] Jackson MJ, Mills B (2009) Vitrification Heat Treatment and Dissolution of Quartz in Grinding Wheel Bonding Systems. British Ceramic Transactions 100(1):1–9.

## Classificação geométrica de rebolos para retificação de ultraprecisão

Diversas geometrias

Diâmetros entre 50 a 400 mm

Tamanho de grãos entre 0,125  $\mu\text{m}$  a 200  $\mu\text{m}$

Rebolos com grãos eletrodepositados com monocamadas ou grãos brazados com posicionamento prévio ramente são usados.



## 2. Tamanho de Grão

O tamanho do grão em rebolos está relacionado a taxa de remoção e ao acabamento:

- a) Grãos pequenos produzem melhores acabamentos.
- b) Grãos grandes permitem maior remoção de material (TRM maior).

*Deve-se ressaltar que a granulometria recomendada para materiais frágeis relaciona-se à profundidade de corte crítica ( $*d_c$ )*

## 2. Tamanho de Grão e $d_c$

Os mecanismos de remoção de material em materiais frágeis baseiam-se na relação entre a tenacidade a fratura e a dureza do material a uma determinada profundidade denominada de profundidade crítica, abaixo da qual a remoção ocorrerá preferencialmente da forma dúctil.

Baseado no critério de propagação da fratura frágil de Griffith, esta fórmula prevê uma profundidade crítica de endentação de:

$$d_c = \frac{E}{H^2} R \quad (1)$$


Onde,  $d_c$  é a profundidade de endentação crítica,  $E$  é o módulo de elasticidade,  $R$  a energia para fraturar o material e  $H$  a sua dureza.

## 2. Tamanho de Grão e $d_c$

Para materiais que exibem uma zona plástica próximo ao topo da trinca, o valor de  $R$  pode ser avaliado usando a análise clássica de propagação de trincas de Griffith.

Uma aproximação para definir a energia de fratura em pequena escala é substituí-la por uma medida dimensionalmente análoga de energia, necessária para propagar trincas, chamada:

$$R = \frac{K_c^2}{H}$$

(2)

## 2. Tamanho de Grão e $d_c$

Na endentação, esta quantidade tem sido chamada de medida efetiva da fragilidade (MARSHALL & LAWN, 1986). Esta quantidade pode ser combinada com o modelo para profundidade crítica da equação (1), produzindo:

$$d_c \propto \frac{E}{H} \left( \frac{K_c}{H} \right)^2 \quad (3)$$

$$d_c = u \frac{E}{H} \left( \frac{K_c}{H} \right)^2 \quad (4) \text{ para materiais cerâmicos } u = 0,15$$

$$d_c = 0,15 \cdot \frac{E}{H} \cdot \left( \frac{K_c}{H} \right)^2 \quad (5)$$

## 2. Tamanho de Grão e $d_c$

$$d_c = 0,15 \cdot \frac{E}{H} \cdot \left( \frac{K_c}{H} \right)^2$$

<b>Material</b>	<b>E (MPa)</b>	<b>H<sub>v</sub> (MPa)</b>	<b>K<sub>c</sub> (MPa. m<sup>1/2</sup>)</b>	<b>d<sub>c</sub> (m)</b>
<b>Alumina</b>	<b>393000</b>	<b>21800</b>	<b>4,5</b>	<b>1,15223 E-07</b>
<b>Germânio</b>	<b>155800</b>	<b>8000</b>	<b>0,6</b>	<b>1,6432 E-08</b>
<b>Silício</b>	<b>188400</b>	<b>11300</b>	<b>0,9</b>	<b>1,58643 E-08</b>
<b>Carbeto de Tungstenio</b>	<b>680000</b>	<b>28110</b>	<b>6</b>	<b>1,65318 E-07</b>

## 2. Tamanho de Grão e $d_c$

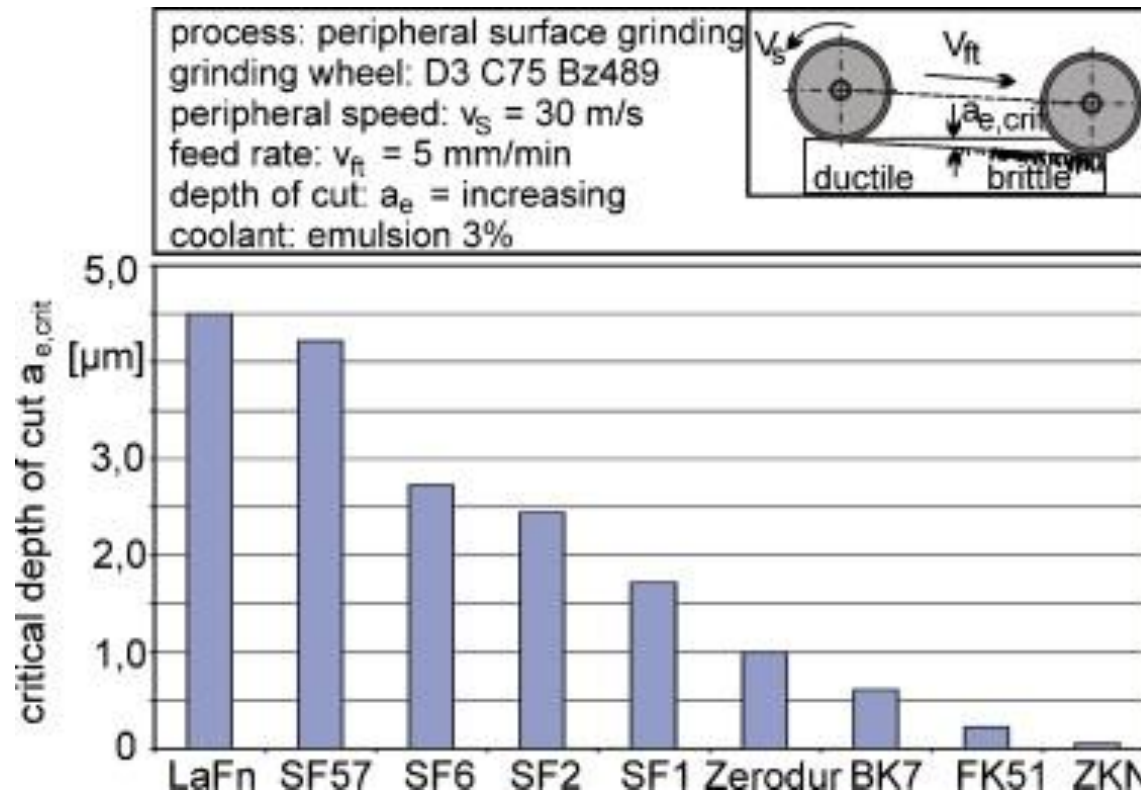


Fig. 9. profundidade crítica de corte, para vidros ópticos[Koch].

Koch N (1992) Duktile Bearbeitung optischer Gläser zur Herstellung asphärischer optischer Linsen. Industrial Diamond Review 2:118–126.

## 2. Tamanho de Grão e $d_c$

Tabela 3. 1-Tabela dos tamanhos de pós de diamante mais utilizados na pasta diamantada e na suspensão diamantada - DIAMANGEO DIAMENTES IND. LTDA (1996).

Tamanho microns	Denominação FEPA	Denominação US MESH	Aplicação
0-1/2		60000	Polir
0-1		28000	Polir
0-2	D 1,0	14000	Polir
1-2	D 1,6	13000	Polir
1-3	D 2,5	12000	Polir
2-4	D 4,0	8000	Polir
3-6		5000	Polir
4-8	D 6,3	3000	Polir
5-10		2200	Polir / Lapidar
6-12	D 10	1800	Polir / Lapidar
9-15		1400	Polir / Lapidar
10-20	D 16	1200	Lapidar
12-22		1100	Lapidar
15-20			Lapidar / Retificar
15-25		1000	Lapidar / Retificar
20-30	D25	800	Lapidar / Retificar
22-36		700	Lapidar / Retificar
30-40	D 40	600	Retificar
36-54		500	Retificar
40-60		400/500	Retificar
54-80	D 63	325/400	Retificar
60-100		270/325	Retificar

Em retificação de ultraprecisão o tamanho do grão pode variar de muito fino ( $\sim 0,125 \mu\text{m}$ ) a grosseiro ( $200 \mu\text{m}$ )

## 3. Grau do rebolo

## 4. Estrutura do rebolo



## 5. Ligante

- Deve aguentar elevadas temperaturas e altas forças centrífugas
- Deve resistir a trepidação durante o choque do contato do rebolo/peça
- Deve segurar os grãos abrasivos rigidamente no lugar para o corte e também permitir que grãos desgastados “soltem-se” para que grãos novos e afiados trabalhem.
- Precisa manter a rigidez do rebolo durante o ciclo

# Ligante

Tipo do Ligante	Características
Resina	<p>Prontamente disponível</p> <p>Primeiro tipo selecionado para o uso de rebolos de diamante</p> <p>Fácil para nivelar e dressar</p> <p>Aplicável para uma faixa de operações</p>
Vítreo	<p>Fácil nivelamento</p> <p>Não necessita dressagem (se selecionado e nivelado corretamente)</p> <p>Porosidade controlada para permitir o escoamento do fluido refrigerante na zona de retificação e remoção de cavaco</p> <p>Formas complexas</p> <p>Vida do rebolo potencialmente mais longa do que resinas</p> <p>Excelente com a utilização de fluidos refrigerantes à óleo.</p> <p>Muito durável</p>
Metal	<p>Alta rigidez</p> <p>Mantém sua forma</p> <p>Boa condutividade térmica</p> <p>Potencial para operações a alta velocidades</p> <p>Geralmente quando altas forças de retificação são requeridas</p> <p>Difícil de nivelar e dressar</p>

Os principais sistemas de ligantes são:

metálico  
resinoide e,  
vitrificado

No caso dos ligantes metálicos pode-se separar em dois tipos diferentes: sinterizado e eletrodepositado

No caso de retificação de ultraprecisão de materiais frágeis usa-se o sistema metálico sinterizado para *wafers* de Si (*slicing e dicing*) [1] e também para micropontas abrasivas montadas [2,3]

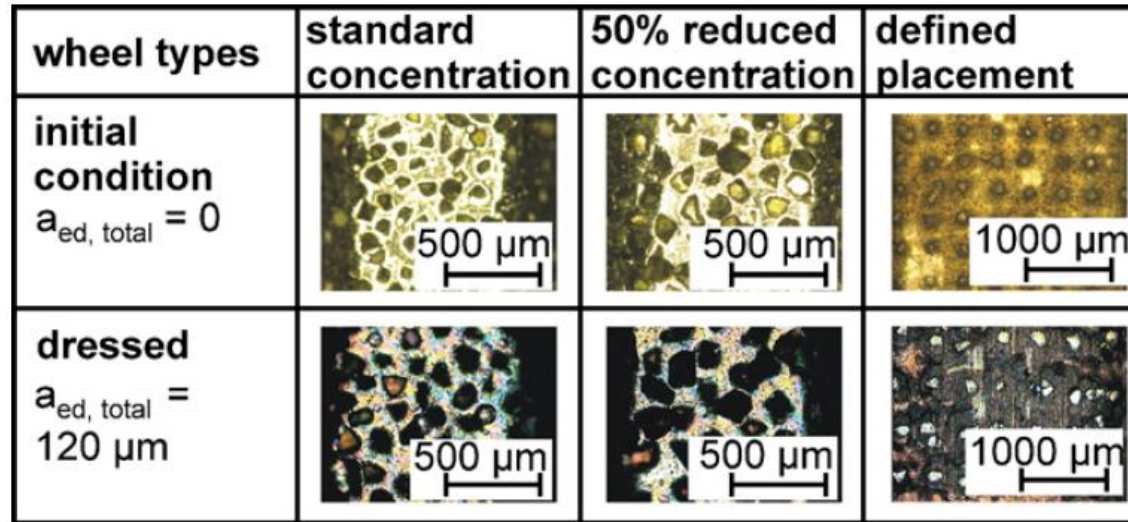
[1] Anderson J, Hollman P, Jakobson S (2001) Abrasive Capacity of Thin Film Diamond Structures. Key Engineering Materials 196:141–148.

[2] Aurich JC, Engmann J, Schueler G, Haberland R (2009) Micro Grinding Tool for Manufacture of Complex Structures in Brittle Materials. Annals of the CIRP 58(1):311–314.

[3] Engmann J, Schueler GM, Haberland R, Walk M, Aurich JC (2009) Efficient Technique for 3rd Micro Structuring of Carbide and Brittle Materials with Diamond Micro-shaft Grinding Tools. Proceedings of the 9th euspen International Conference, vol. 2, San Sebastian, Spain, 97–100.

No caso de ligante metálicos com eletrodeposição são aplicados para rebolos monocamadas com posicionamento bem definindo dos grãos [4].  
Maior resistência ao desgaste e maior condutividade térmica

[4] Rickens K, Grimme D, Brinksmeier E (2006) Deterministic Machining of Brittle Materials Applying Engineered Diamond Wheels. Proceedings of the 6th euspen International Conference, vol. 2, Baden bei Wien, Austria, 216–219.

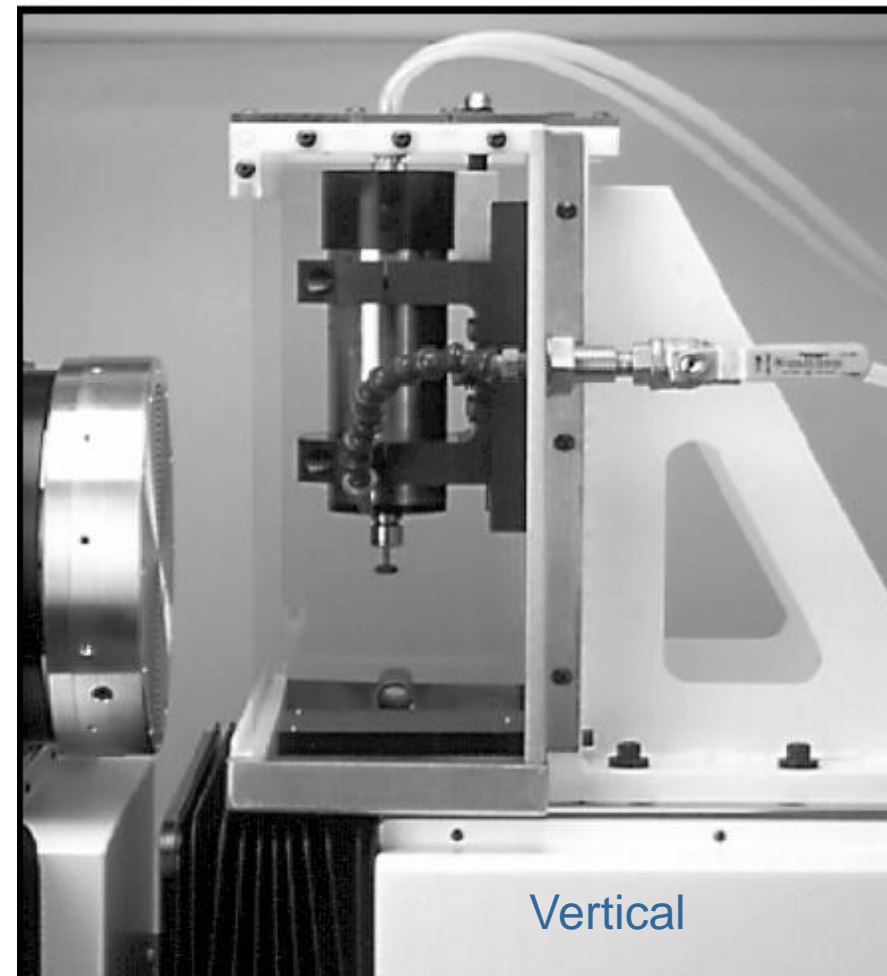
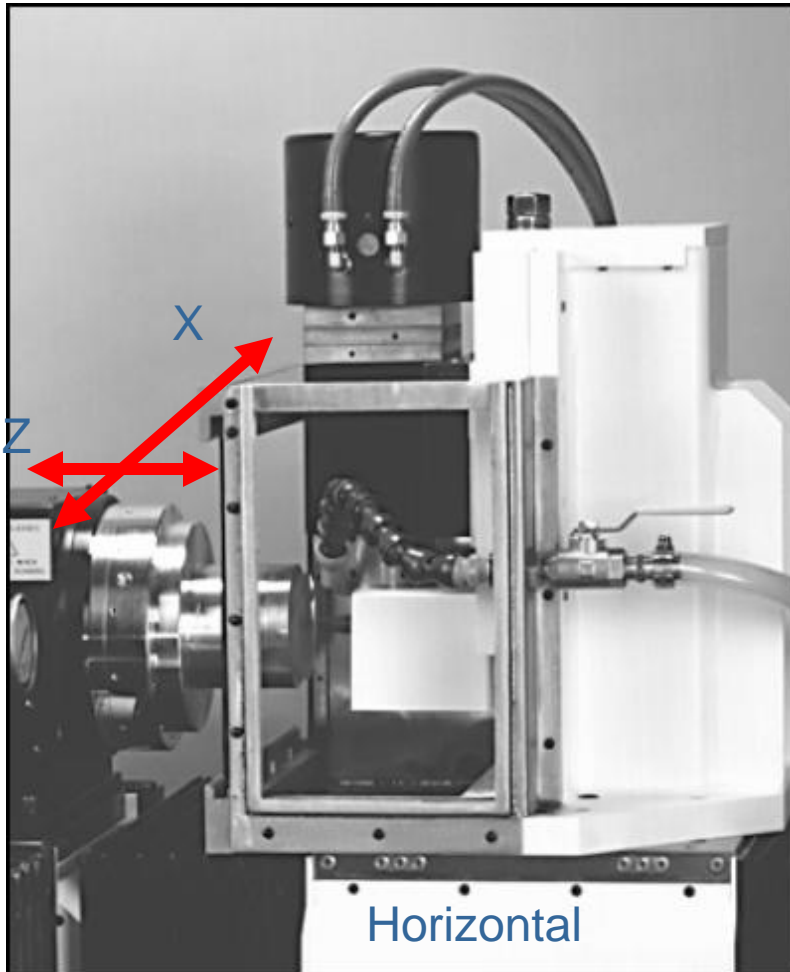


**Fig. 12.** Engineered diamond grinding wheels for ultra-precision grinding processes with blocky-type, cube-octahedral coarse diamond grits after electroplating and after dressing [154].

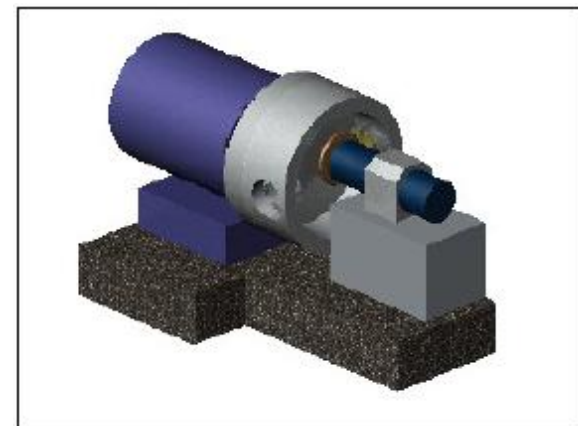
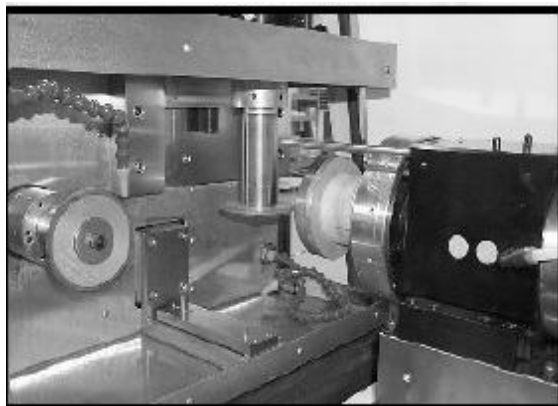
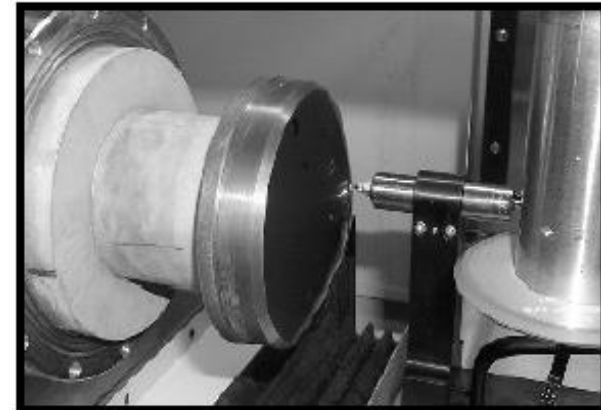
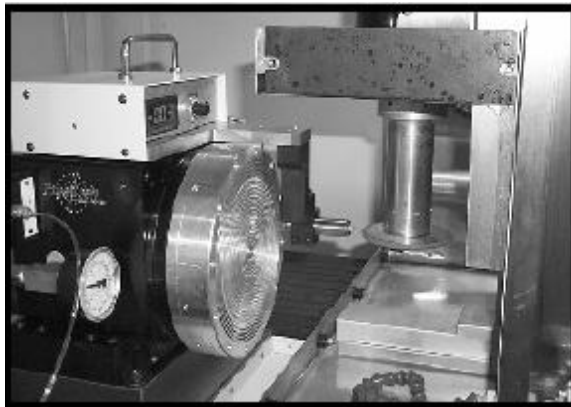
Disposição fina e com grãos uniformes garantem interação melhor durante usinagem. Quando combinado com cobertura de Ti, estes grãos oferecem aumento da resistência mecânica e química no processo de eletro deposição o qual reduz significativamente o arrancamento de grãos e melhora o desempenho em termos de desgaste causado por processos indiretos/indeterminado de perda de afiação do rebolo.

[154] Rickens K (2010) Deterministisches Schleifen optischer Gläser mit grobkörnigen Diamantschleifscheiben. German Ph.D. Thesis, Universität Bremen

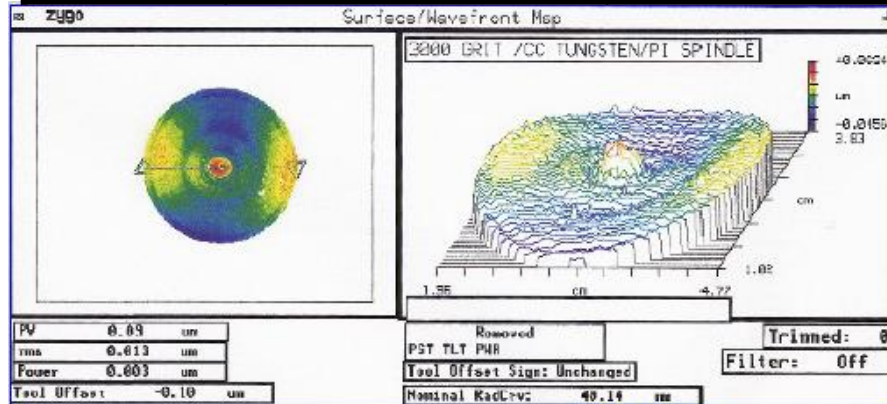
## Configuração de retificação de Ultraprecisão 2 eixos (“rotativos”) sobre 2 eixos (“planos”)



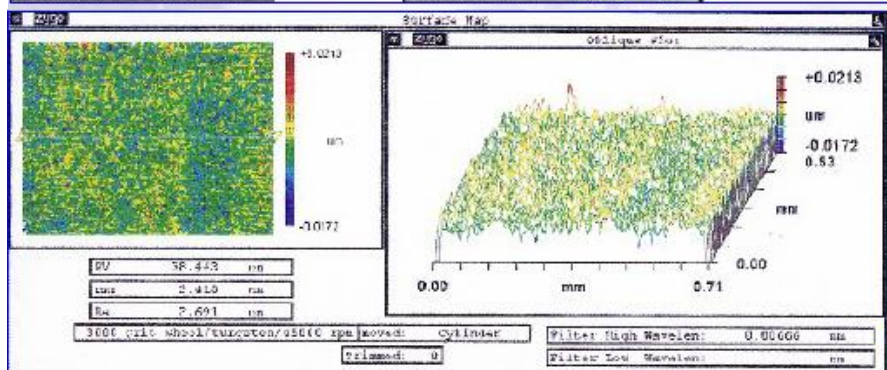
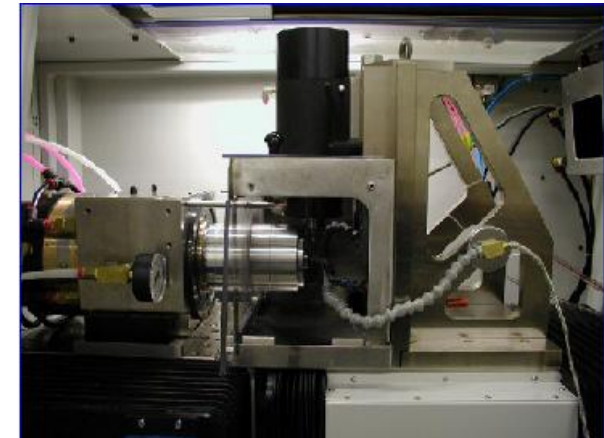
## Configuração de retificação de Ultraprecisão 2 eixos sobre 2 eixos excêntricos



		Parâmetros de corte	
<b>Máquina</b>	Nanoform 2 eixos	Rot. Peça	291 rpm
<b>Material</b>	WC	Rotação rebolo	30000 rpm
<b>Superfície</b>	Convexa com 30mmφ	ap	0,3 μm
		Avanço	0,5 mm/min
		Rebolo	3000 grit wheel



Forma	
PV	0,09 μm
rms	0,013 μm

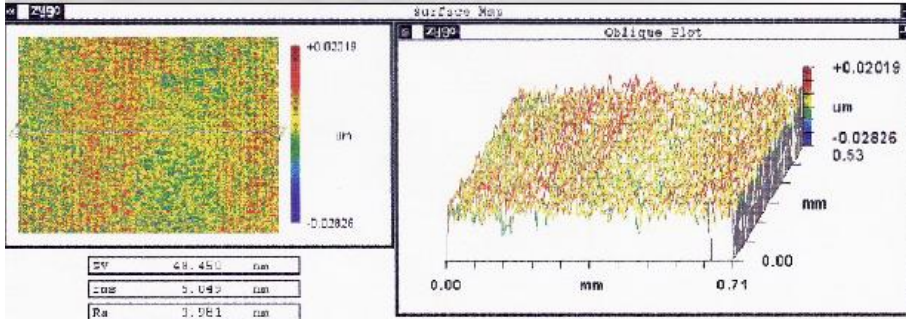


Rugosidade	
PV	38,443 nm
rms	3,410 nm
Ra	2,6 nm

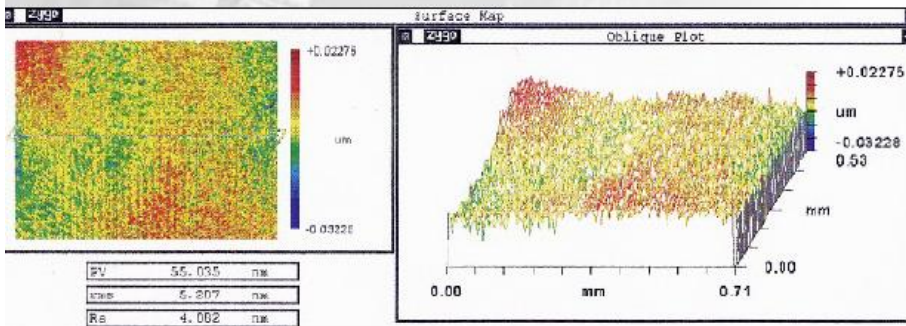




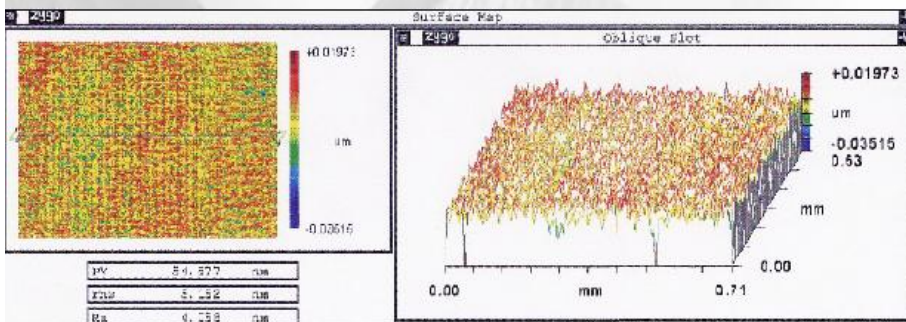
# Aplicações



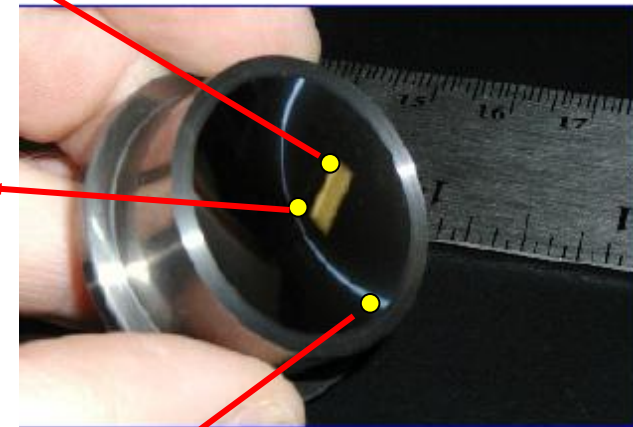
7,5 mm do  
centro  
Ra 3,981 nm



centro  
Ra 4,082  
nm



15 mm do  
centro  
Ra 4,058 nm

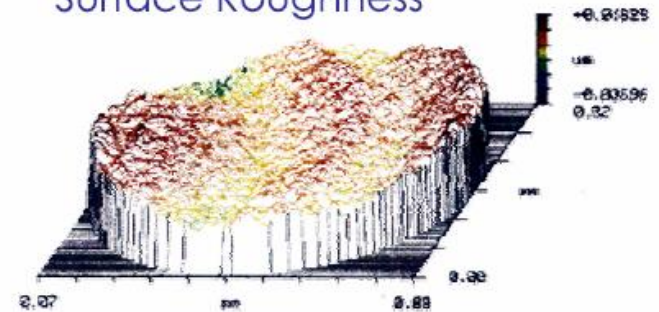


## Usinagem de molde de lente em WC



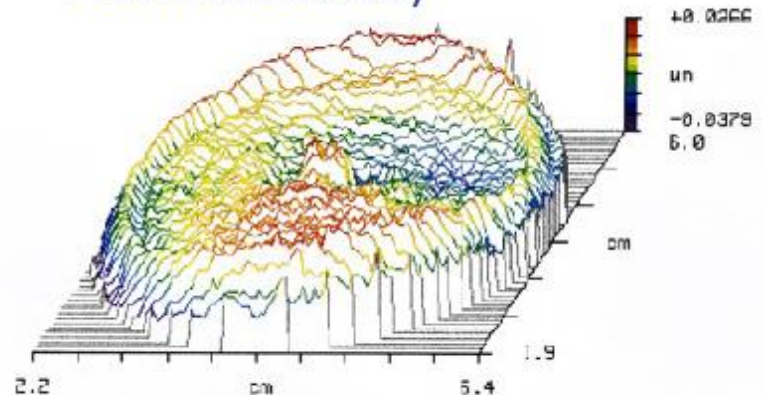
Esferico concava – 0,119 mm de profundidade sagital sobre um abertura de 6,4 mm  
Vel. Arvore: 45000 rpm  
Vel. Peça: 330 rpm  
ap: 0,3  $\mu\text{m}$   
Avanço; 0,5 mm/min  
Rebolo: 1000 grit wheel

Surface Roughness



Ra 0.0044  $\mu\text{m}$

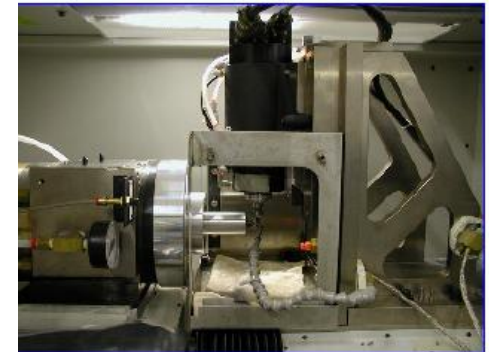
Form Accuracy



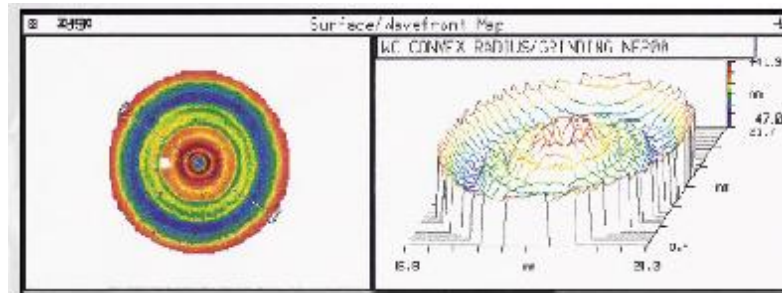
P-V 0.065  $\mu\text{m}$

## Usinagem de molde de lente em WC

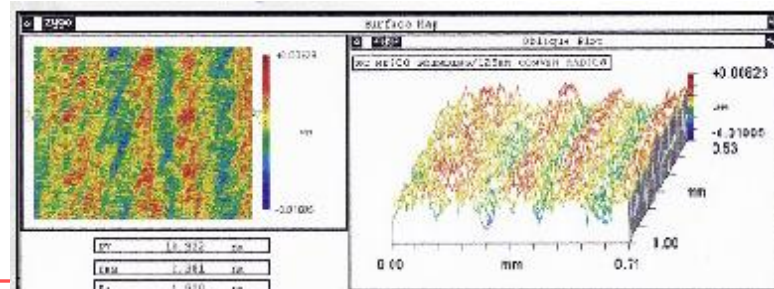
		Parâmetros de corte	
<b>Máquina</b>	Nanoform 2 eixos	Rot. Peça	550 rpm
<b>Material</b>	WC	Rotação rebolo	20000 rpm
<b>Superfície</b>	Convexa 12,5 mm com $\phi$ 125mm	ap	0,2 $\mu$ m
	Rebobo montado na vertical	Avanço	0,5mm/min (acab.)
		Rebolo	2000 grit wheel



Forma	
P-V	0,089 $\mu$ m

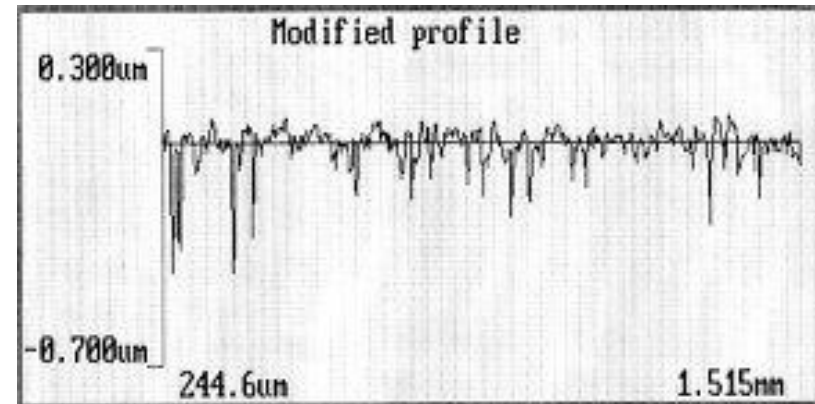


Rugosidade	
rms	2,4 nm
Ra	1,9 nm

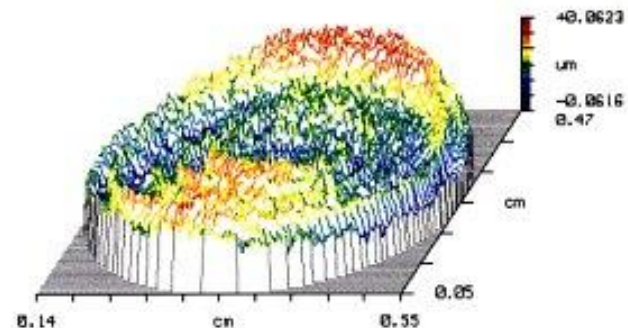


# Aplicações

## Exemplo



Rugosidade - Ra 35.7 nm - Rms 54.1 nm



Desvio de Forma - Rt 0.124 μm

Parâmetros de usinagem

Material: SiC

Rotação do rebolo = 45000 RPM

Rotação da peça = 360 rpm

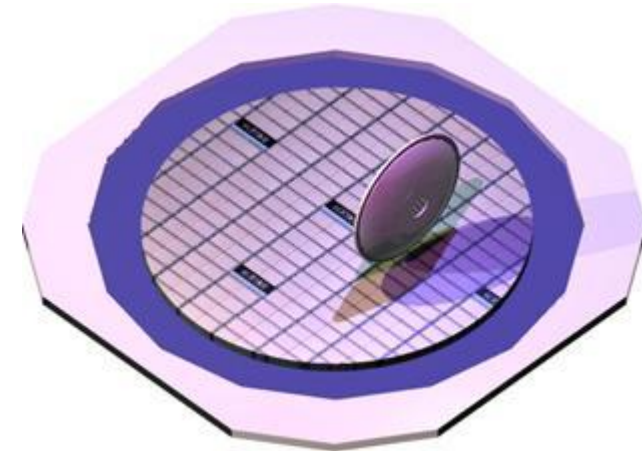
Profundidade de Usinagem = 0.1 μm

Avanço = 1.25 mm/min

Rebolo = grit 1200 diamante natural

Fonte: [www.precitech.com](http://www.precitech.com)

## Laminas de Dicing

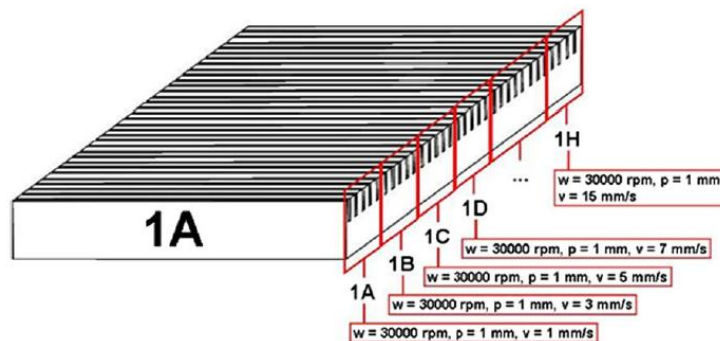


Laminas com espessuras entre  $10\ \mu\text{m}$  e  $1\ \text{mm}$

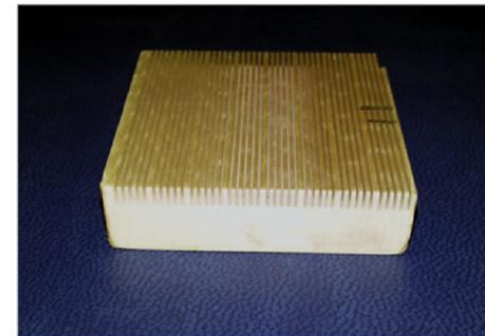
Possuem abrasivos com dimensão entre  $1$  e  $46\ \mu\text{m}$

Quando o ligante é metálico, o abrasivo é sinterizado ou eletrodepositado.

Rebolos com diâmetros entre  $50 - 60\ \text{mm}$ .



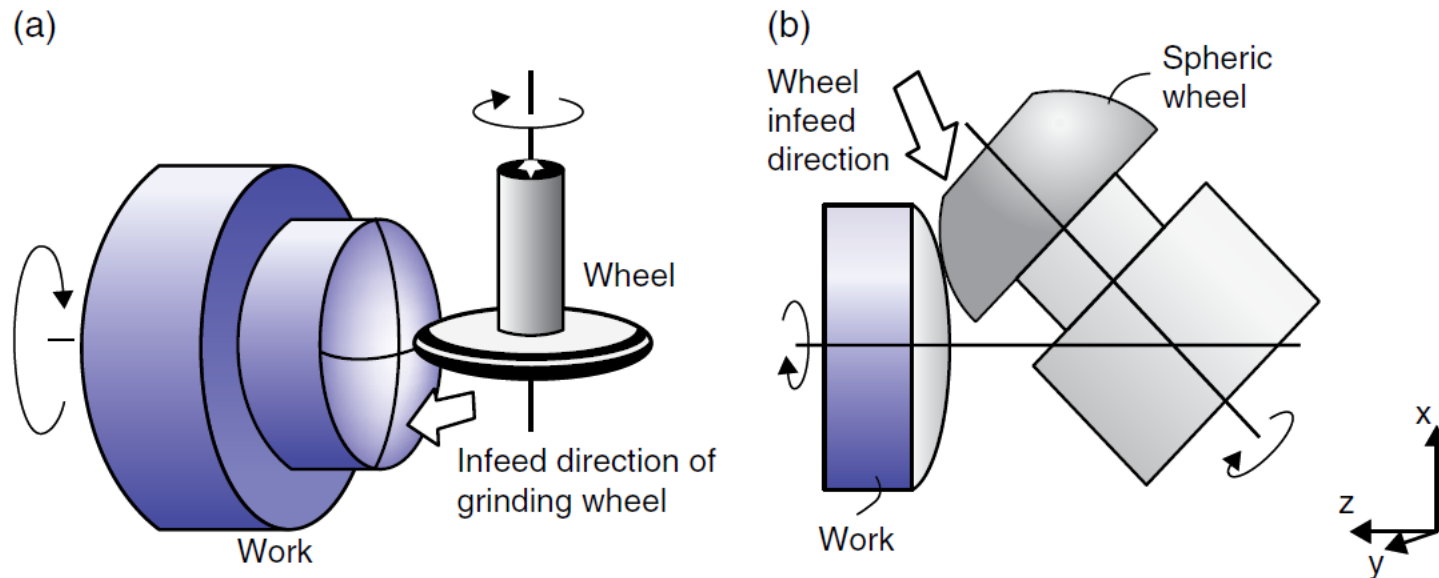
(a)



(b)

# Microretificação

## Abordagens de Retificação para Microretificação

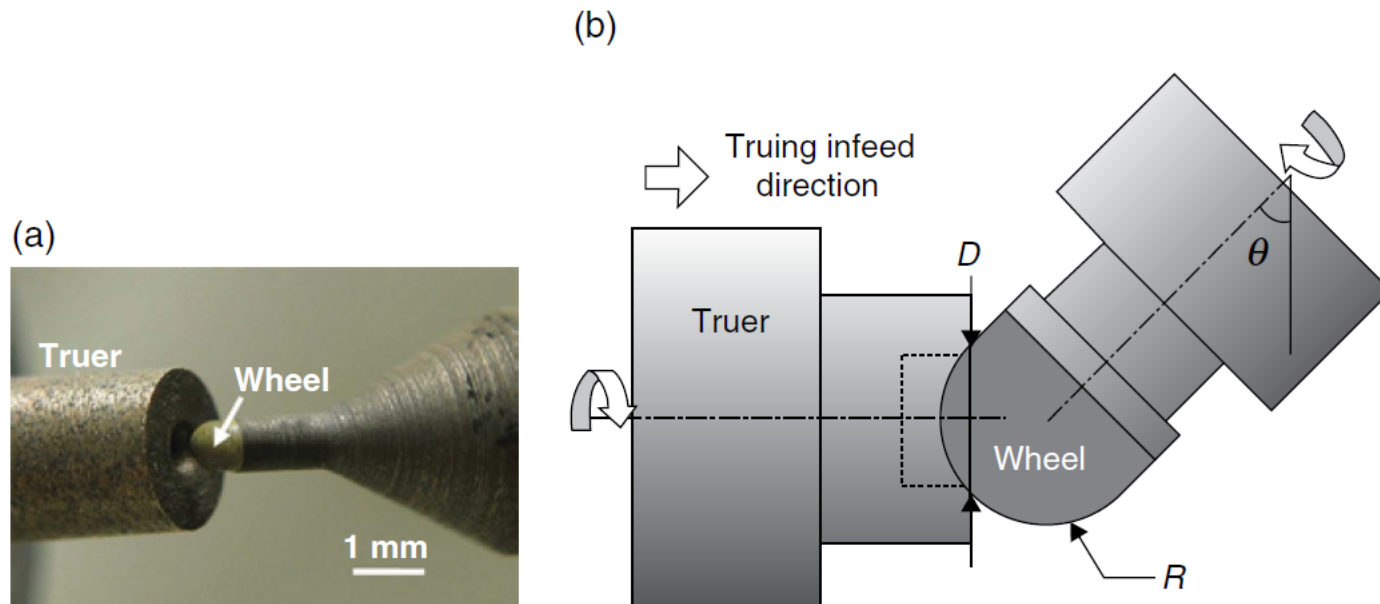


**Figure 10.8** Schematic illustration of (a) the cross and (b) parallel grinding methods. Reproduced from [35]. Copyright 1996 Elsevier

[35] Kuriyagawa, T., Sepasy, M.S., and Syoji, K. (1996) A new grinding method for aspheric ceramic mirrors, *J. of Mater. Proc. Tech.* 62:387–392.

## Microretificação

### Perspectivas de implementação: Afição e dressagem



**Figure 10.9** (a) The truing set-up for diamond micro wheels with spherical shape. (b) Schematic illustration of the developed truing and dressing techniques. Dressing is also performed using the same set-up, but with SiC slurry as dressing media. Reproduced from [16]. Copyright 2005 Elsevier

## Microretificação

Perspectivas de implementação: Caracterização da topografia do rebolo e distribuição das arestas de corte

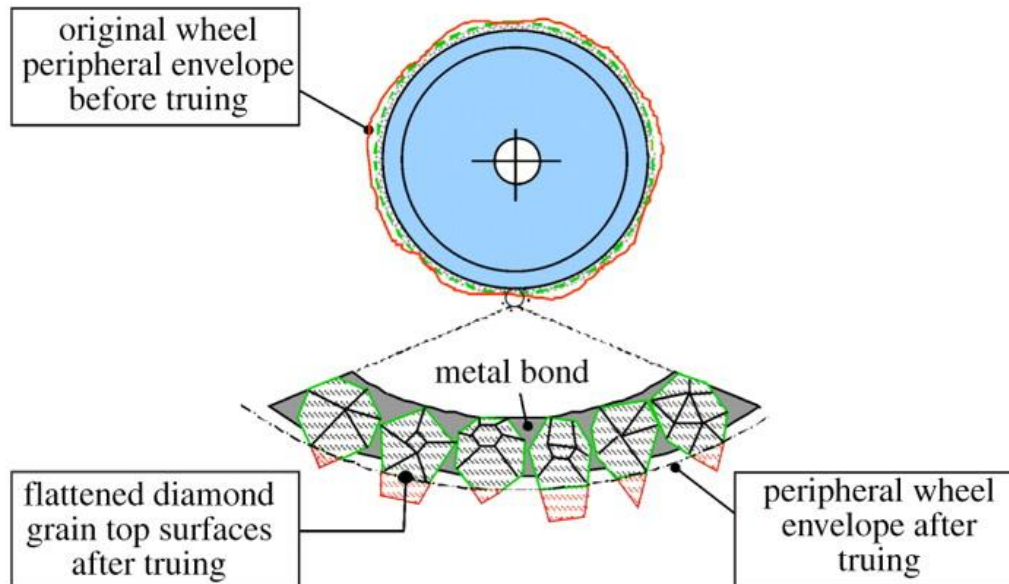
Em micro retificação abrasivos se solta do rebolo revelando novos grãos: muda topografia do rebolo

Informação detalhada da topografia: distribuição de grão, variação da altura de aresta cortante e forma do rebolo – fundamentais para controlar regime dúctil

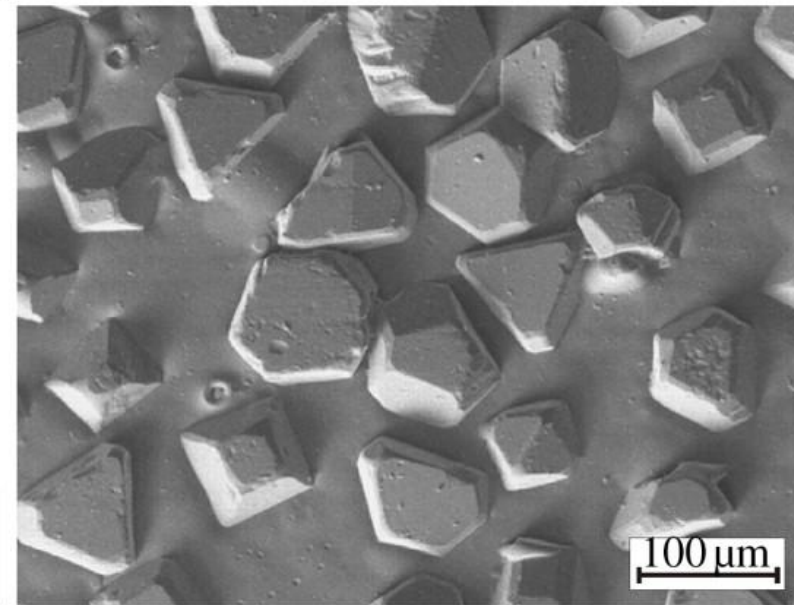


## Truing of coarse-grained diamond wheels within the abrasive layer.

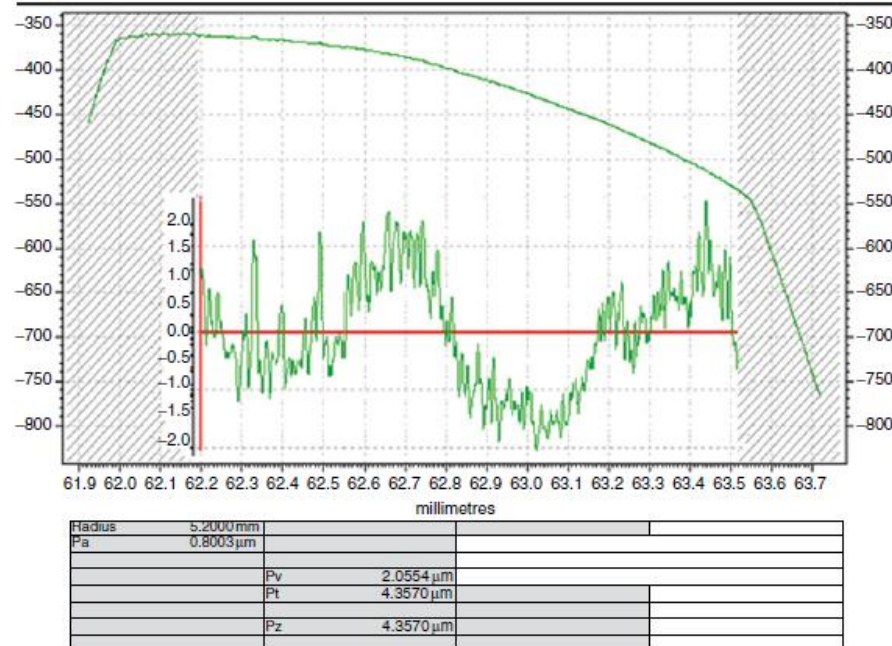
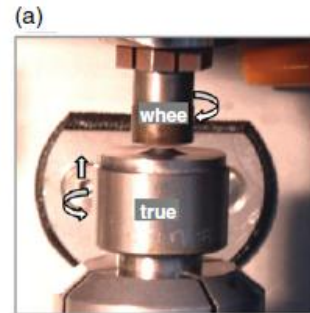
(a)



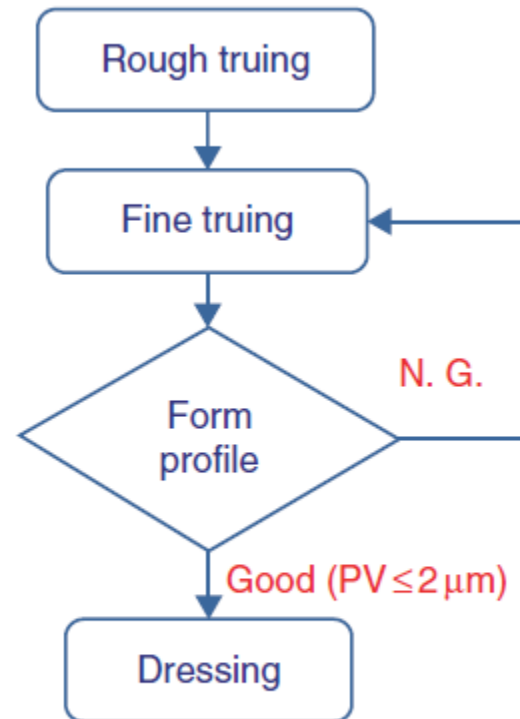
(b)



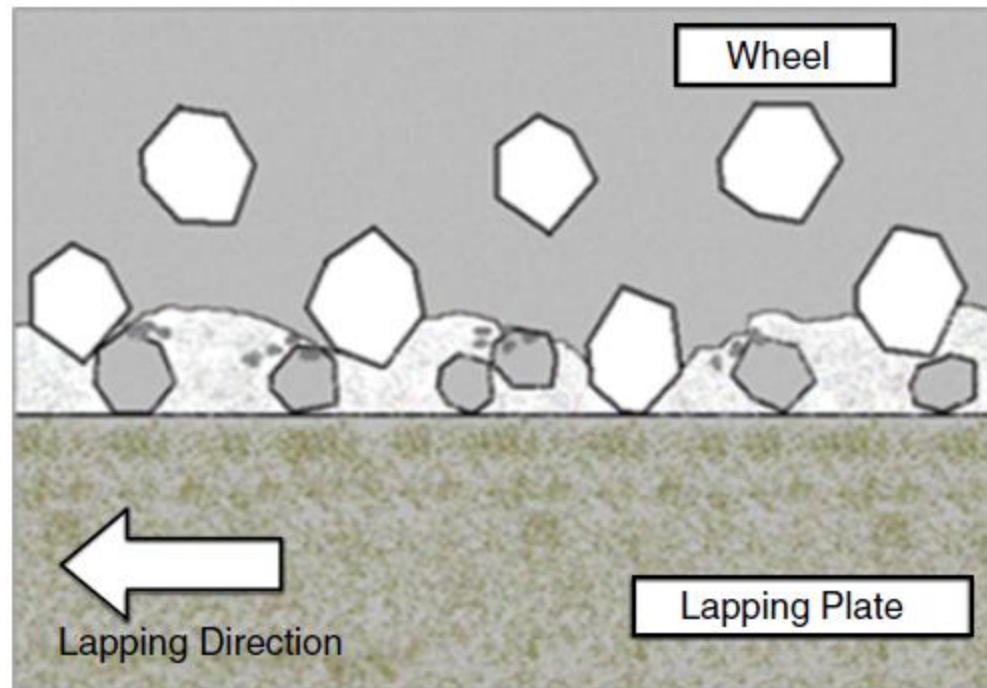
Zhao, Q. L., Wang, B., Brinksmeier, E., Riemer, O. & Rickens, K. 2008 ELID assisted precision conditioning of coarse-grained diamond wheels. *Key Eng. Mater.* **364–366**, 578–583. (doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.364-366.578)



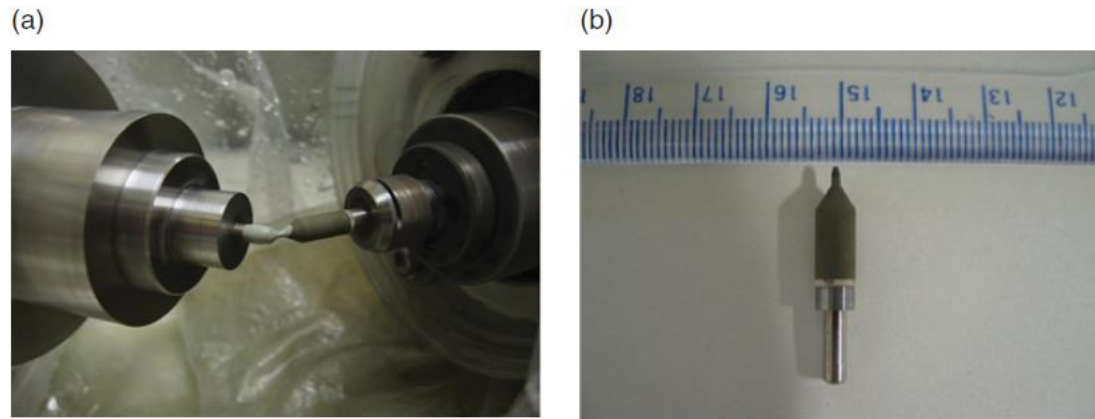
**Figure 10.10** (a) Truing set-up for micro spherical wheel. (b) Trued profile of a grinding wheel of 1 mm in diameter. The wheel profile was measured using a Talysurf profilometer (b) Reproduced with permission from [25]. Copyright 2004 Elsevier



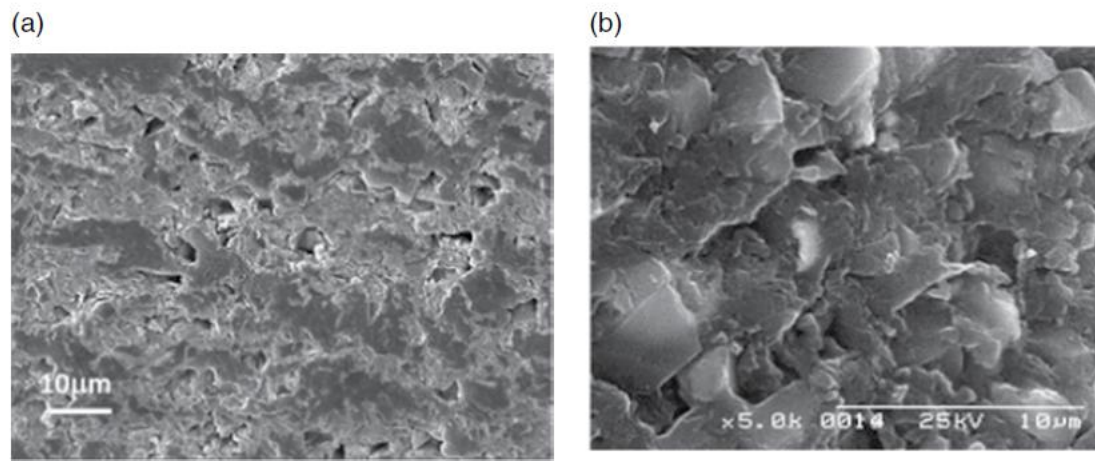
**Figure 10.11** A flow chart showing the truing and dressing procedure for micro grinding wheels



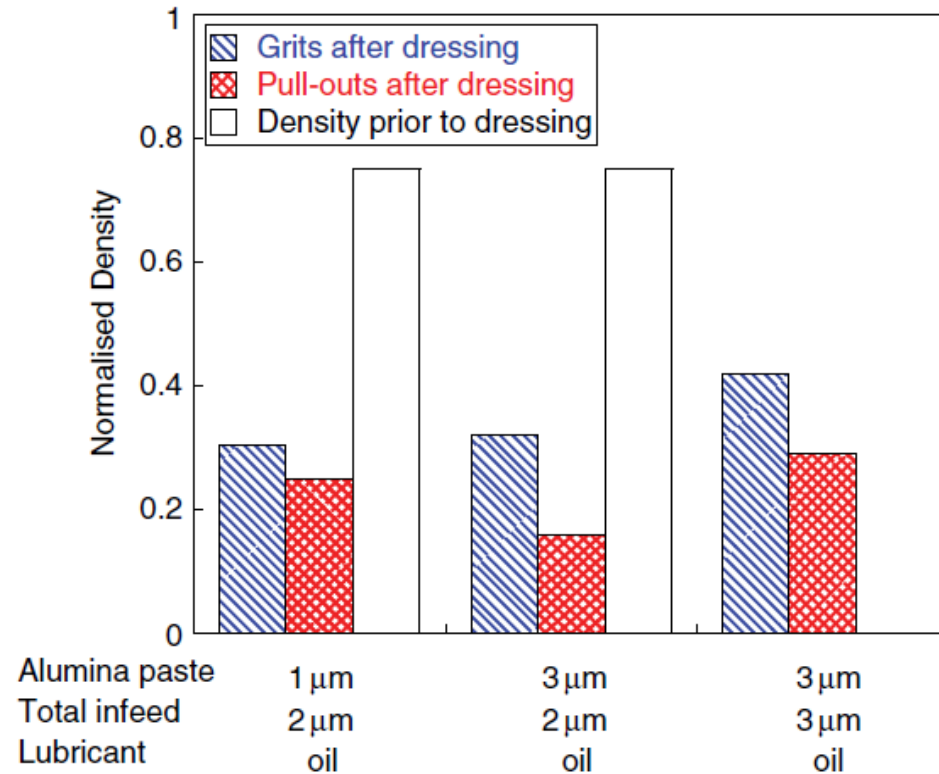
**Figure 10.12** Illustration of the free abrasive lapping process for dressing micro grinding wheels. Shaded particles are dressing abrasives and unshaded particles are diamond grits on the wheel. Reproduced from [15]. Copyright 2005 Elsevier



**Figure 10.13** (a) Illustration of a dressing process for micro grinding wheels. (b) The micro grinding wheel after trued and dressed



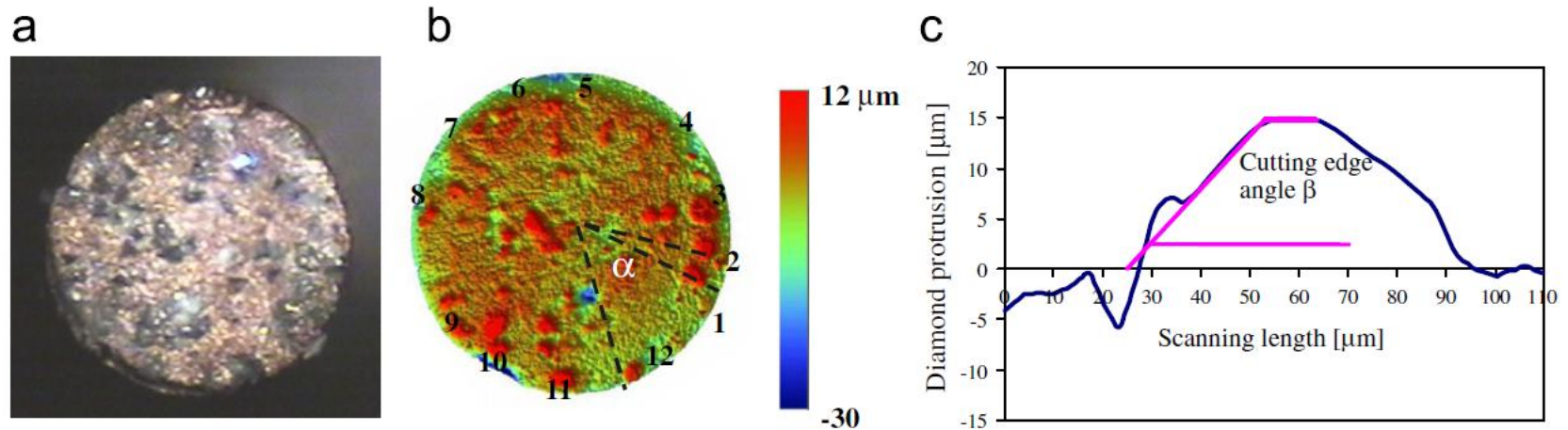
**Figure 10.14** (a) Wheel surface after truing. (b) Wheel surface after appropriate dressing



**Figure 10.15** Densities of exposed and pull-out grits on the wheel surfaces after dressing using lapping method with alumina pastes of different grit sizes. The resin bond wheel has a grit size of  $10\mu\text{m}$  and a volume fraction of 25%

## Microretificação

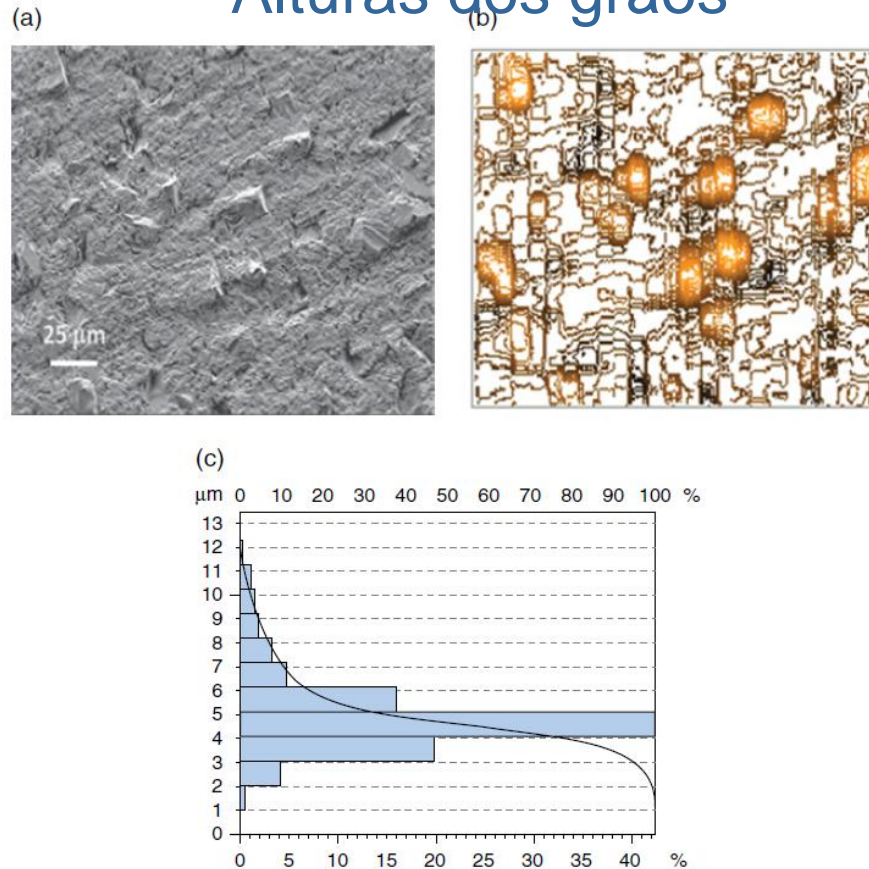
Rebolos para micro retificação normalmente possuem uma quantidade pequena de arestas de corte envolvidas na remoção de material : a compreensão das características superficiais e a distribuição de grão np rebolo após a reafiação e dressagem tornam-se mais críticas do que em retificação convencional.



**Fig. 6.** Microgrinding tool (a) microscope pictures, (b) 3D tool topography and (c) line-scan of Diamond 2.

Jie Feng, Peng Chen, Jun Ni Prediction of surface generation in microgrinding of ceramic materials by coupled trajectory and finite element analysis. Finite Elements in Analysis and Design 57 (2012) 67–80

# Perspectivas de implementação: medição da distribuição das Alturas dos grãos



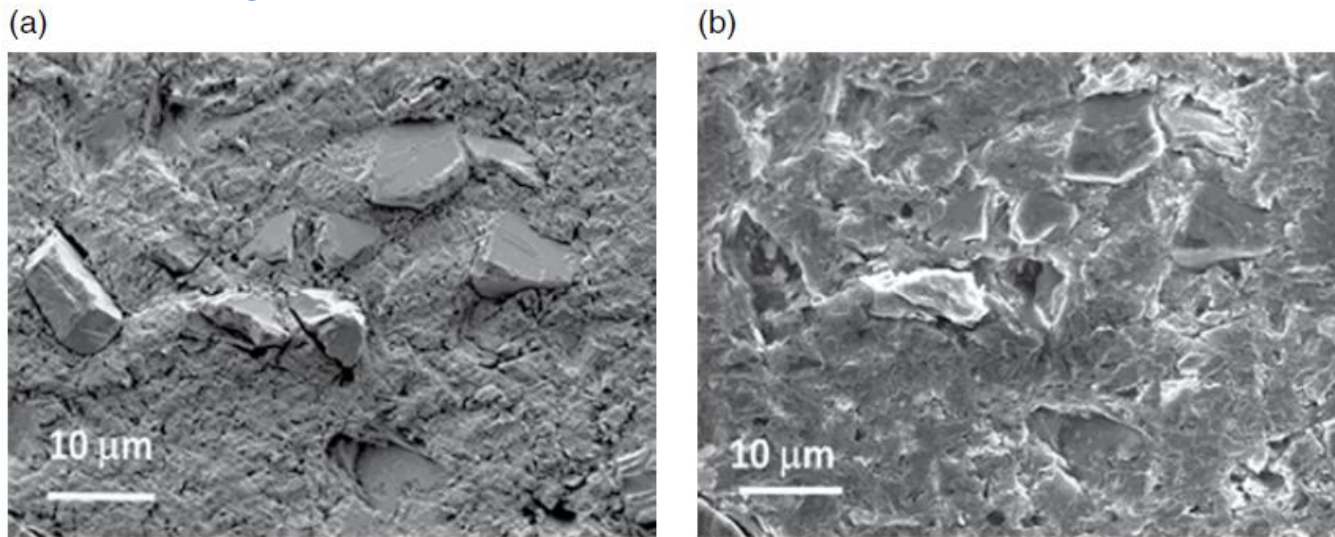
**Figure 10.16** (a) SEM image and (b) profilometer-scanned topography of wheel surface with a grit size of 20 μm after truing and dressing, showing good exposure of diamond abrasive grits. (c) Distribution of grit heights. Reproduced from [15]. Copyright 2005 Elsevier



## Perspectivas de implementação: Caracterização do desgaste abrasivo

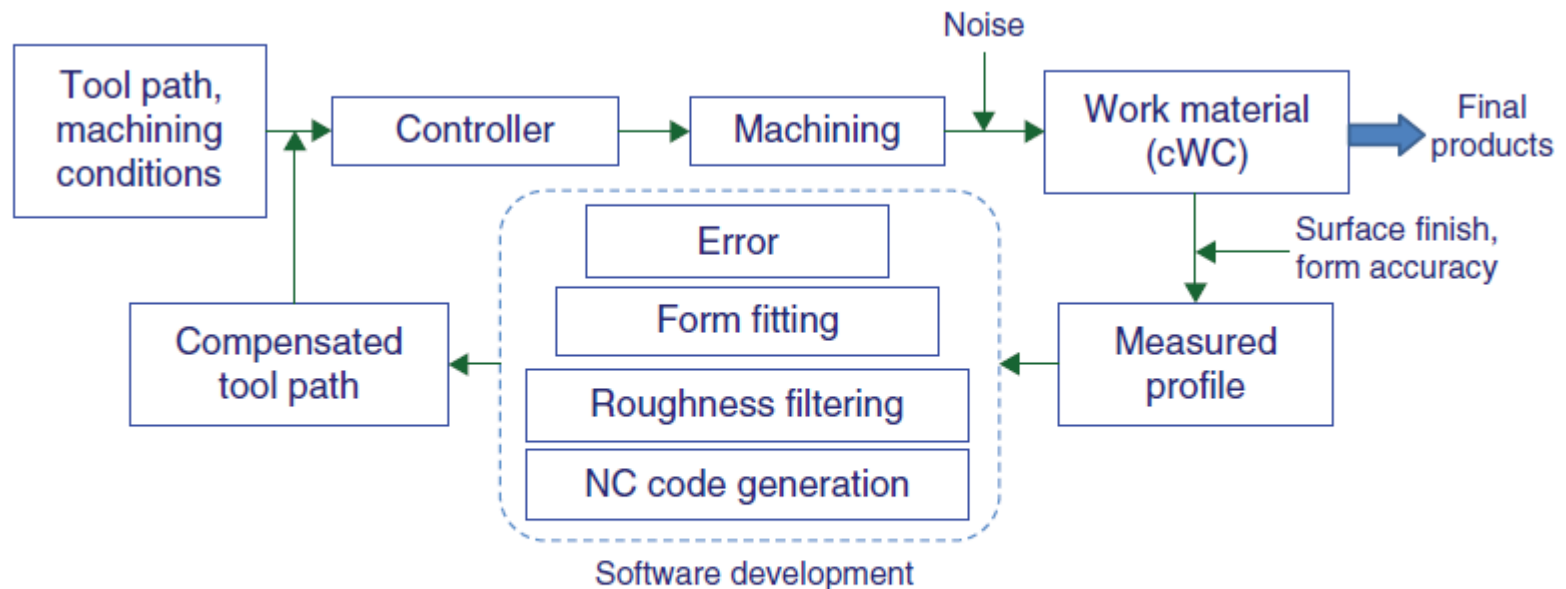
Desgaste abrasivo forte em grãos de diamante na retificação de materiais duros e frágeis.

O desgaste abrasivo deve ser mais significativo em micro/nanoretificação uma vez que a quantidade de grãos abrasivos envolvidos é muito menor.



**Figure 10.17** Comparison of grinding wheel surfaces (a) prior to and (b) after grinding for a certain period of time. Resin bond wheel of a grit size of 15 µm and abrasive volume fraction of 25%

## Perspectivas de implementação: Compensação da perfil de retificação



**Figure 10.18** A flow chart of micro profile grinding, indicating the role of error compensation in the grinding process

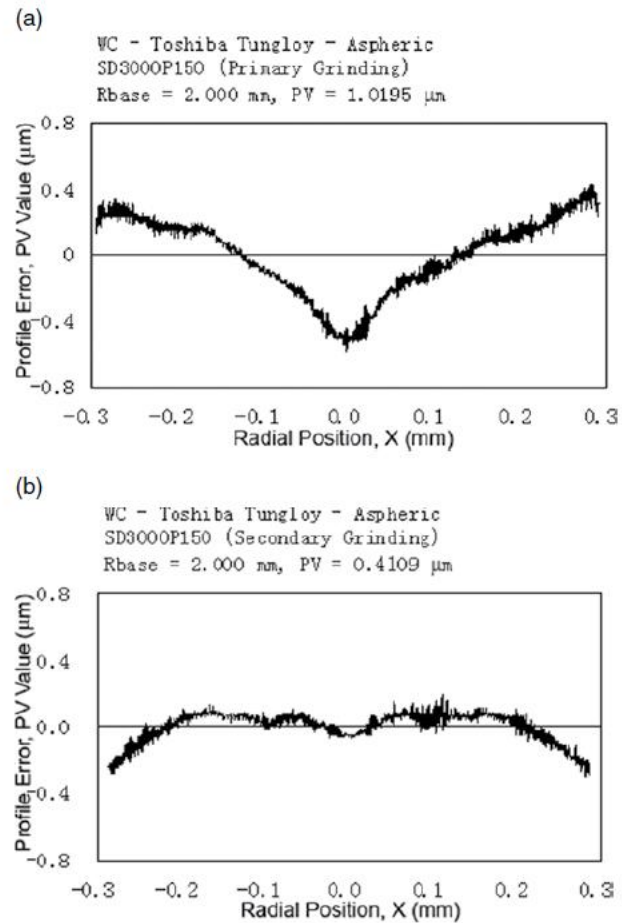
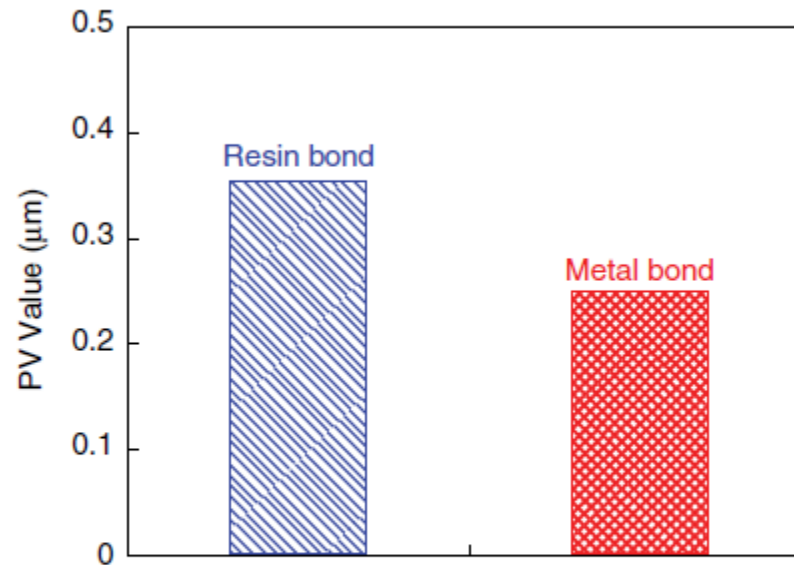


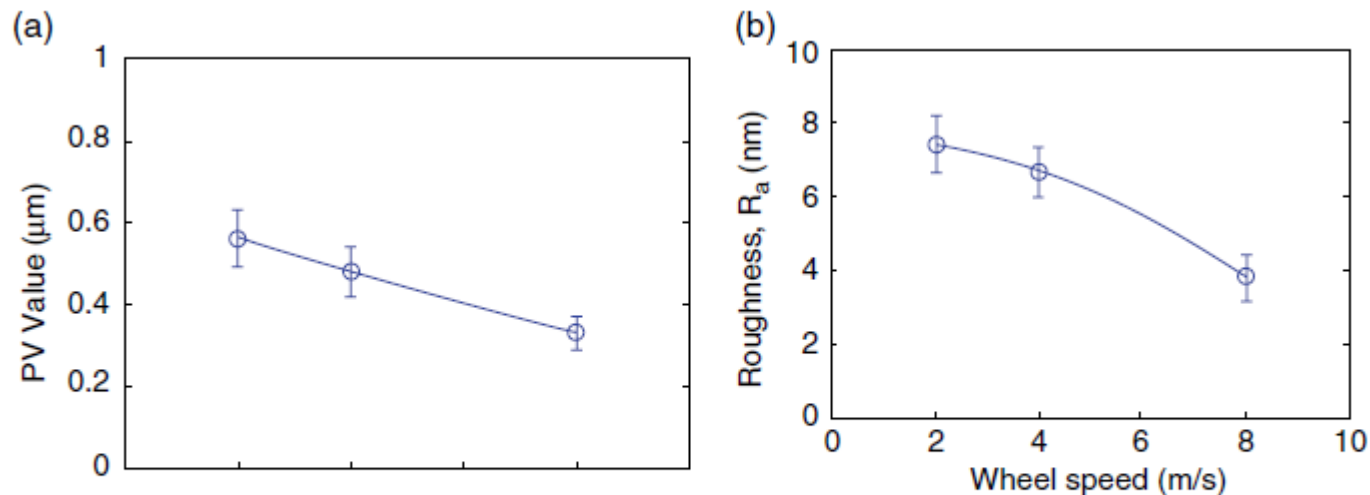
Figure 10.20 Progress of profile error with compensated grinding of mould insert of 600 $\mu\text{m}$  in diameter. Reproduced from [28]. Copyright 2007 Elsevier

## Efeitos Paramétricos em retificação de perfil Efeito do tipo de ligante



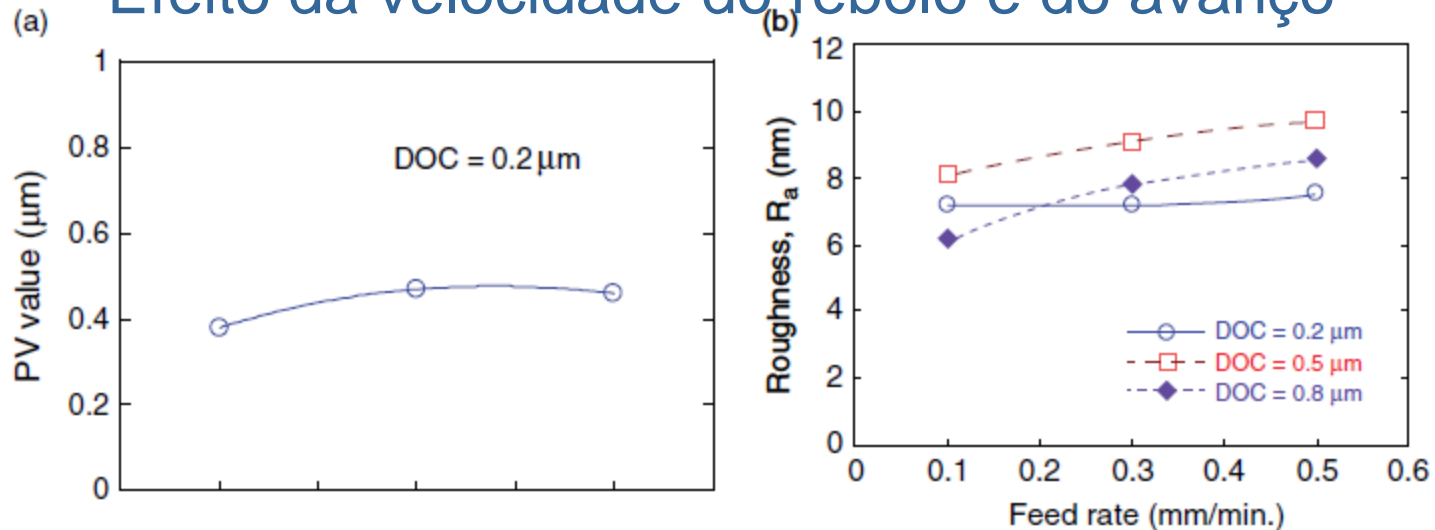
**Figure 10.24** Effect of wheel bond type on the profile accuracy generated by grinding. Toshiba ULG-1002 ultra precision grinding machine, work material: cemented tungsten carbide, diamond wheel grit size:  $4\mu\text{m}$ , wheel speed:  $8\text{ m/s}$ , feed rate:  $0.2\text{ mm/min.}$ , depth of cut:  $0.2\mu\text{m}$ . The starting profile error remained the same as  $1.2\mu\text{m}$  in peak-to-valley value.

## Efeitos Paramétricos em retificação de perfil Efeito da velocidade do rebolo e do avanço



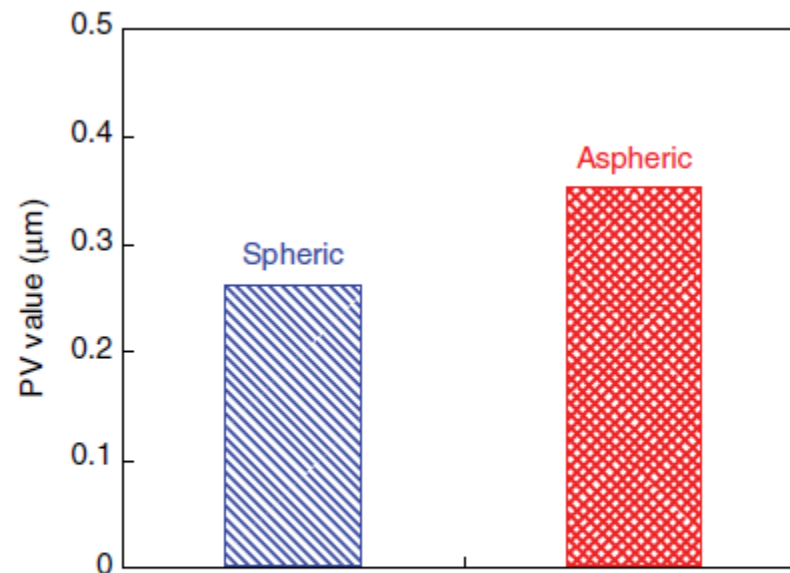
**Figure 10.25** Effect of wheel speed on (a) profile accuracy and (b) roughness. Toshiba ULG-1002 ultra precision grinding machine, work material: cemented tungsten carbide, diamond resin bond wheel, grit size:  $8\mu\text{m}$ , feed rate:  $0.2\text{ mm/min.}$ , depth of cut:  $0.2\mu\text{m}$

## Efeitos Paramétricos em retificação de perfil Efeito da velocidade do rebolo e do avanço



**Figure 10.26** Effect of feed rate on (a) profile accuracy and (b) roughness. Toshiba ULG-1002 ultra precision grinding machine, work material: cemented tungsten carbide, diamond resin bond wheel, grit size: 8 μm, wheel speed: 8 m/s, depth of cut: 0.2 μm

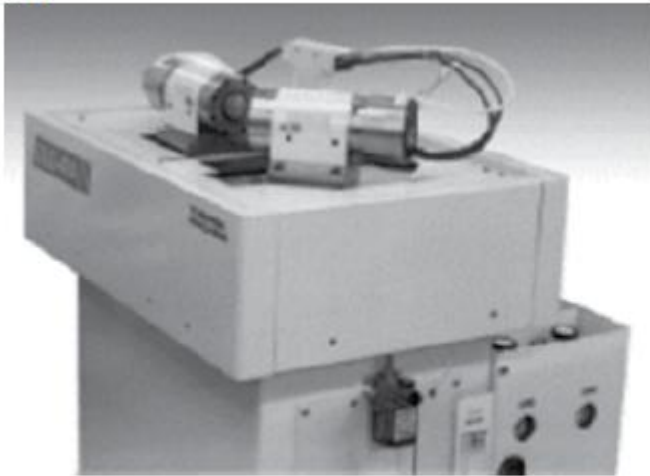
## Efeitos Paramétricos em retificação de perfil Efeito da velocidade do rebolo e do avanço



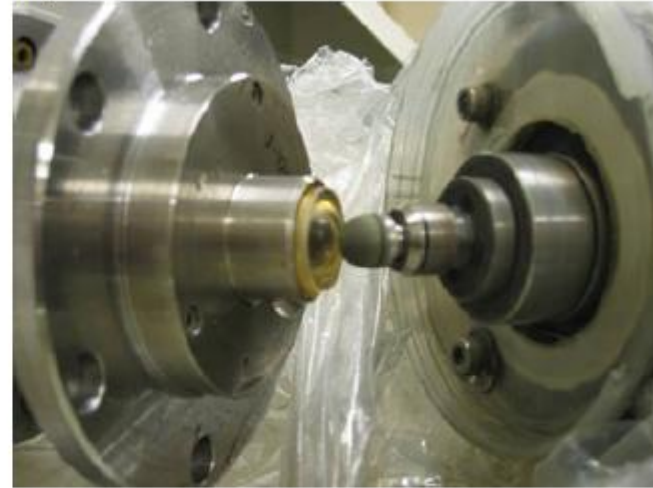
**Figure 10.27** Effect of profile shapes on the ground profile accuracy. Toshiba ULG-1002 ultra precision grinding machine, work material: cemented tungsten carbide, diamond resin bond wheel, grit size: 8 µm, wheel speed: 8 m/s, feed rate: 0.2 mm/min., depth of cut: 0.8 µm

## Aplicações de Micro Retificação Moldes de superfície anesféricas

(a)



(b)

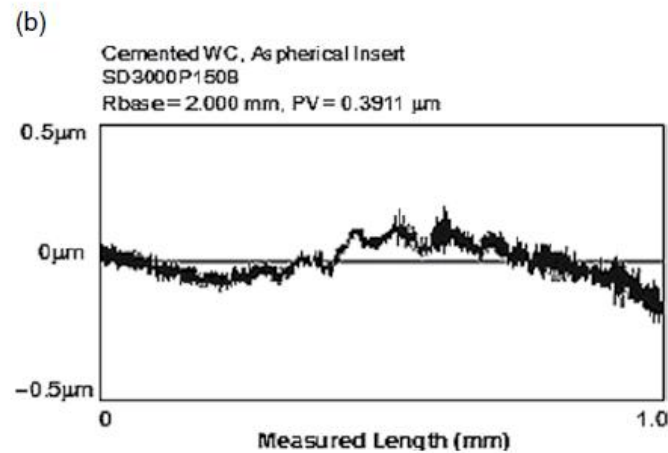
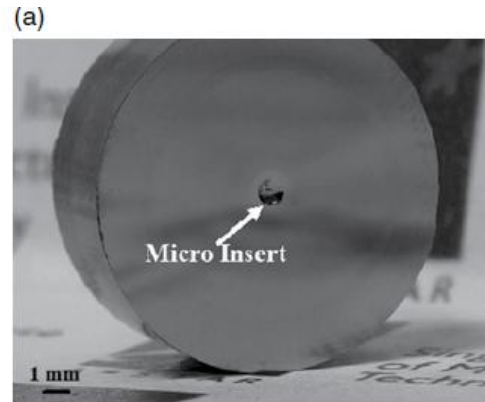


**Figure 10.28** Toshiba ULG-1002 ultraprecision grinding machine used for micro grinding of aspherical moulds made of cemented tungsten carbide. (a) Full view; (b) Grinding set-up

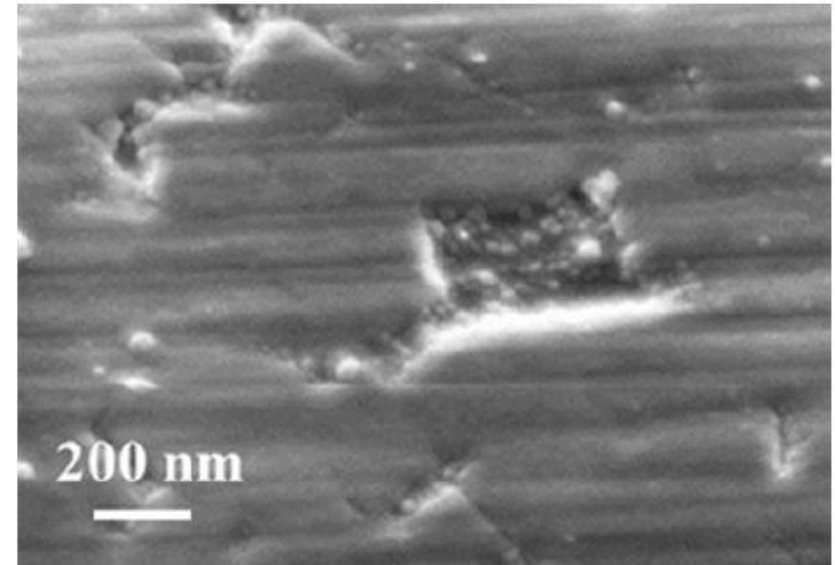
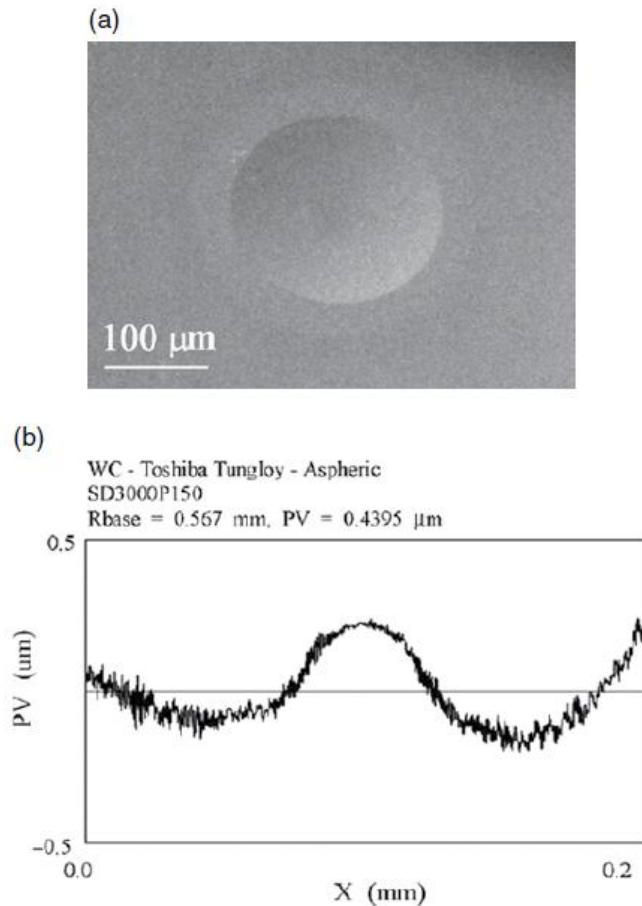


**Table 10.2** Truing, dressing and grinding conditions used. [16]

Wheel	SD3000P150B, 1 mm in diameter
Truer/dresser	SD400N75M, cup wheel type
<b>Truing conditions</b>	
Wheel speed (rpm)	10,000
Truer speed (rpm)	200
Feed rate ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	1
Coolant	Water soluble type
<b>Dressing conditions</b>	
Wheel speed (rpm)	2,000
Truer speed (rpm)	200
Feed rate ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	0
Coolant	none
Slurry for dressing	GC6000
<b>Grinding conditions</b>	
Wheel speed (rpm)	20,000
Truer speed (rpm)	300
Feed rate (mm/min)	0.1
Infeed per pass ( $\mu\text{m}$ )	0.8
Coolant	Water soluble type

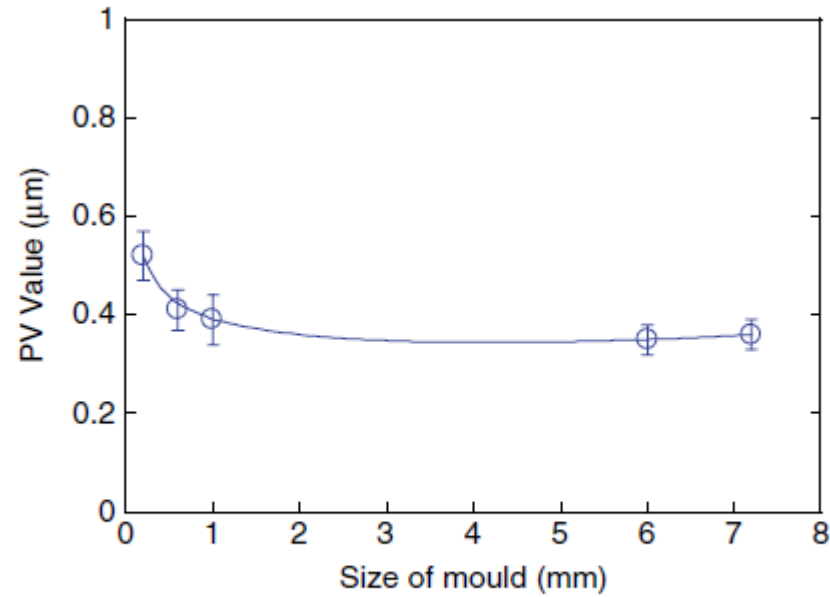


**Figure 10.30** (a) Micro mould of 900  $\mu\text{m}$  in diameter. (b) Profile error after 1st compensation grinding measured using Talysurf profilometer (a) Reproduced from [16]. Copyright 2005 Elsevier



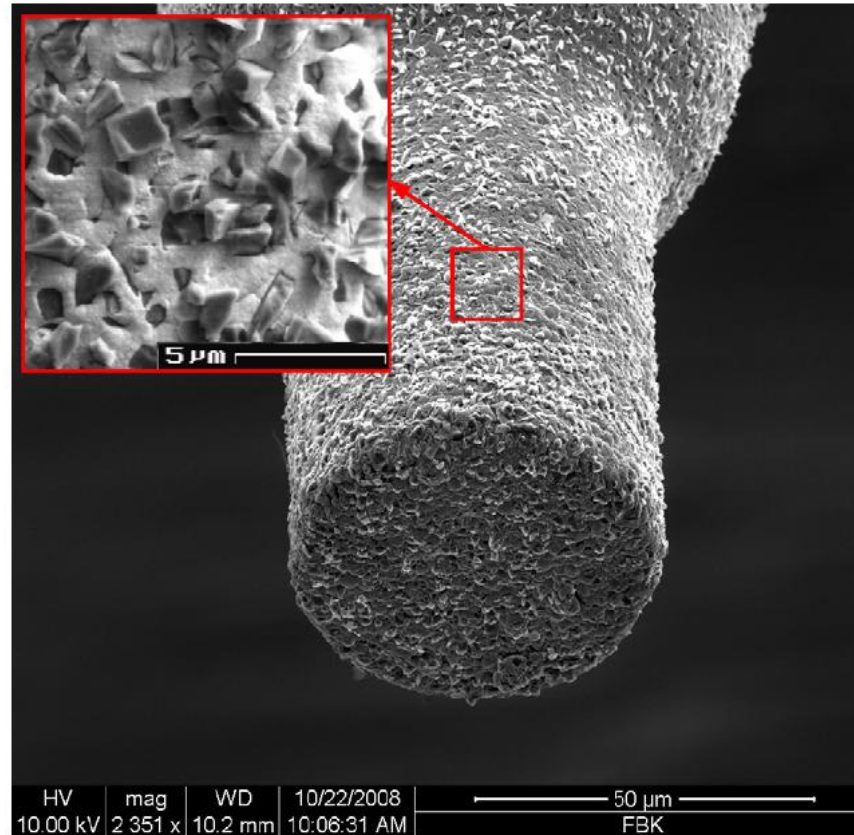
**Figure 10.32** SEM images of ground surfaces

**Figure 10.31** (a) A micro aspherical mould of 200µm in diameter. (b) Profile error after 1st compensation grinding measured using Talysurf profilometer. Reproduced from [16]. Copyright 2005 Elsevier



**Figure 10.33** Size effect in the micro grinding of mould inserts

## Aplicações de Micro Retificação Fabricação de canais para Micro fluidica



**Fig. 2.** SEM-image of a grinding tool with diameter 45  $\mu\text{m}$  and tool surface 1–3  $\mu\text{m}$  grit size.

J.C. Aurich, J. Engmann, G.M. Schueler, R. Haberland Micro grinding tool for manufacture of complex structures in brittle materials CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 (2009) 311–314



Fig. 5. High speed air bearing spindle.

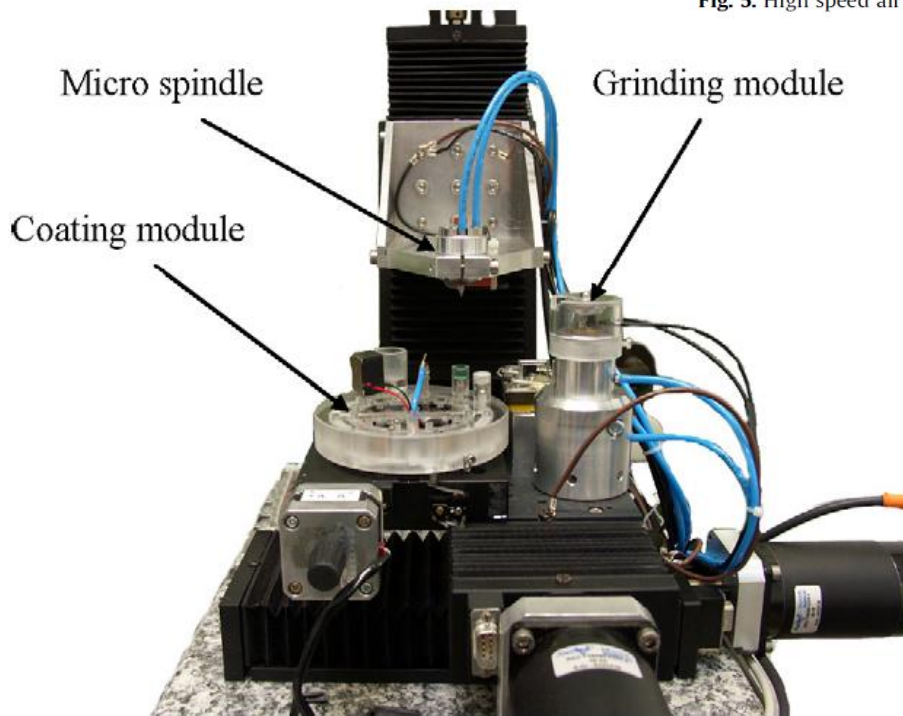


Fig. 4. Micro tool manufacturing machine.

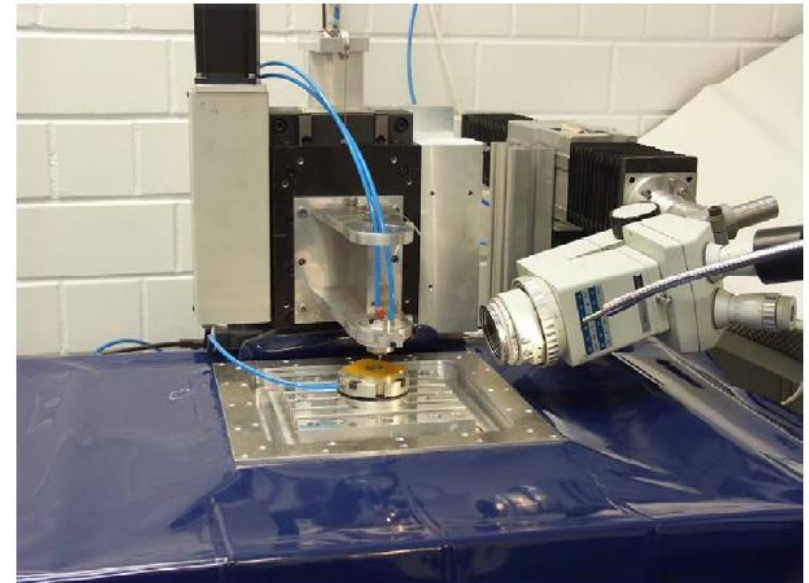
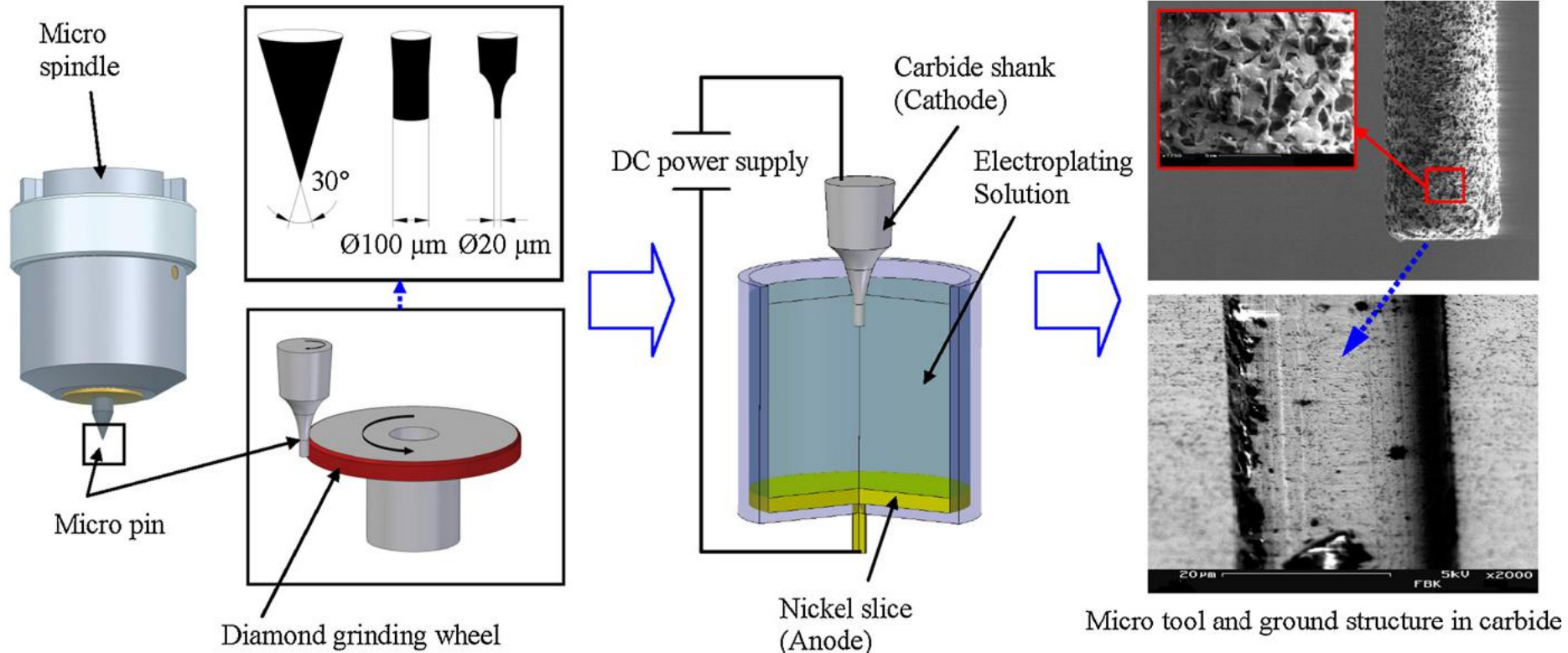


Fig. 6. Micro grinding and milling machine.



**Fig. 3.** Manufacturing concept.

# Aplicações de Micro Retificação Resultados

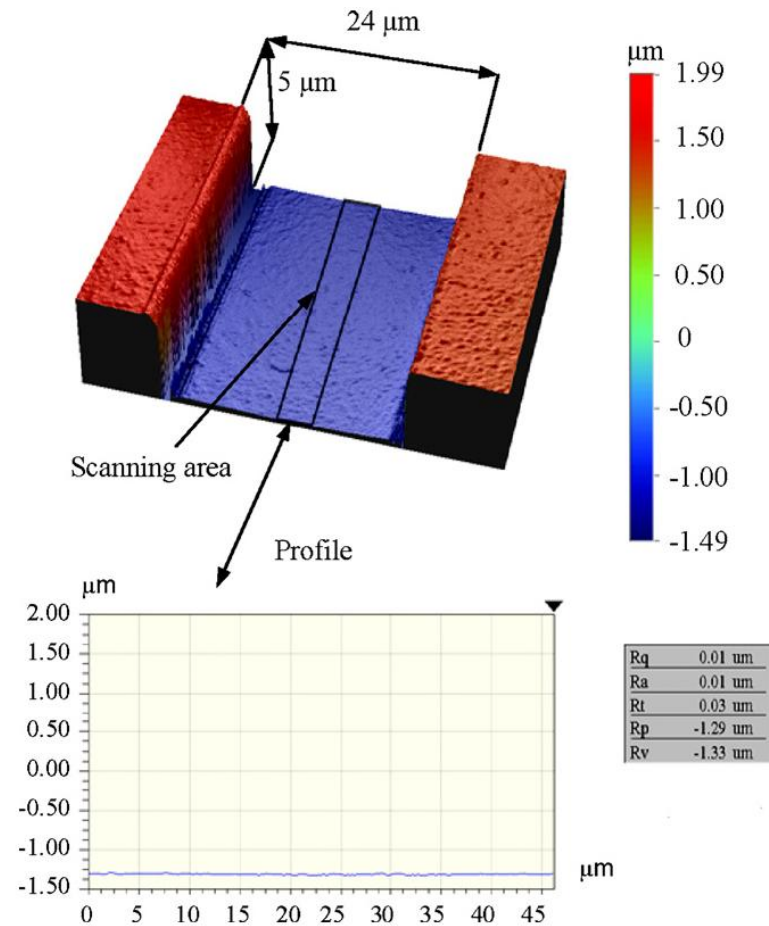
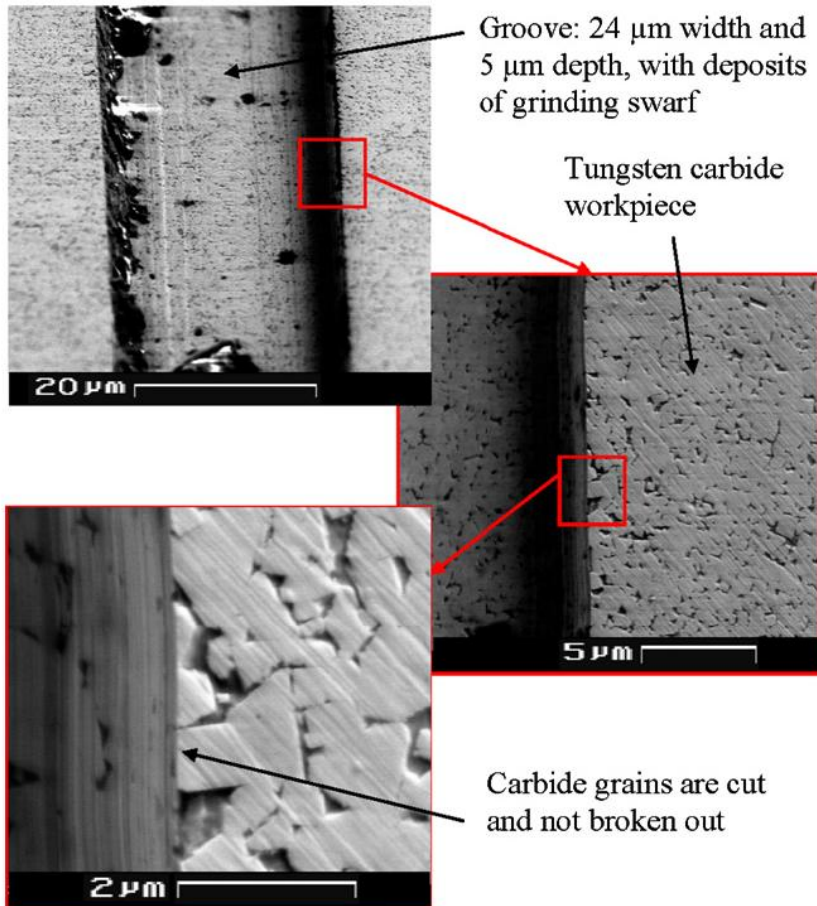


Fig. 8. White-light interferometer picture of the structure.

Fig. 7. Manufactured microstructures in carbide (DK460); carbide grain size 0.6  $\mu\text{m}$ , 90% WC.



## Bibliografia

- [1]. Cheng, K., Huo, D., Micro-cutting: Fundamentals and application, United Kingdon: 2013, 348p.
- [2]. Davim, J.P. Jackson M.J., Nano And Micromachining, John Wiley Professional, 2009, 212p.
- [3]. Jahanmir, S., Rhamulu, M., Koshy, P. Machining of ceramics and composites, Marcel Decker, 1999, 704p.
- [4]. Vários Autores, Usinagem de Ultraprecisão, Porto, A.J.V. (Org.) Rima ed. 2004.
- [5]. Venkatesh; V. C. Izman; S. Precision Engineering. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2007, 418p.
- [6]. Yan, J.W, Patten, J. editors. Semiconductor machining at the micro-nano scale , Kerala, India: Transworld Research Network, 2007, 360 p.
- [7]. E. Brinksmeier, Y. Mutlugünes , F. Klocke , J.C. Aurich, P. Shore, H. Ohmori Ultra-precision grinding. CIRP Annals - Manufacturing Technology 59 (2010) 652–671.