

# MICROUSINAGEM: AULA 6

Microtorneamento e Torneamento de Ultraprecisão

**Prof. Assoc. Renato Goulart Jazinevicius**

**Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues**

## SUMÁRIO

Introdução  
Histórico  
Máquinas comerciais  
Ferramentas de diamante  
Materiais usináveis com diamante  
Aspectos Críticos na Usinagem de Materiais Metálicos  
Policristalinos  
Aplicações

## Introdução

O termo “micro usinagem” (ou, em inglês: ‘micro-machining’ ) refere-se a um processo de usinagem através do qual pequenas (“microscópicas”) porções de material são removidas de maneira a alcançar um elevada exatidão geométrica que, de outra forma, seria inatingível.

Em função da quantidade de material removida localmente, em um processo de microusinagem, ser muito pequena e a taxa de remoção ser geralmente muito baixa (Tabela 1), a micro usinagem é particularmente adequada a fabricação de microestruturas e micro peças

Tabela 1. Faixas de operação e qualidade superficial pelos processos nano-, micro- e macro.

	nano-machining	micro-machining	macro-machining
size of machined area	1–10 <sup>5</sup> μm <sup>2</sup> (ex. 100μm x 1000 μm)	1–10 <sup>5</sup> mm <sup>2</sup>	1–10 <sup>5</sup> cm <sup>2</sup>
volume removal in one machining step	from 10 <sup>-3</sup> to 10 <sup>2</sup> μm <sup>3</sup>	from 10 <sup>-3</sup> to 10 <sup>2</sup> mm <sup>3</sup>	from 10 <sup>-3</sup> to 10 <sup>2</sup> cm <sup>3</sup>
material removal rate	from 10 <sup>-5</sup> to 1 μm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	from 10 <sup>-5</sup> to 1 mm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	from 10 <sup>-5</sup> to 1 cm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
relative figure error	from 10 <sup>-5</sup> to 10 <sup>-3</sup>	from 10 <sup>-7</sup> to 10 <sup>-5</sup>	from 10 <sup>-5</sup> to 10 <sup>-3</sup>
surface roughness (S <sub>a</sub> )	1–10 <sup>2</sup> Å	1–10 <sup>2</sup> nm	from 10 <sup>-1</sup> to 10 μm

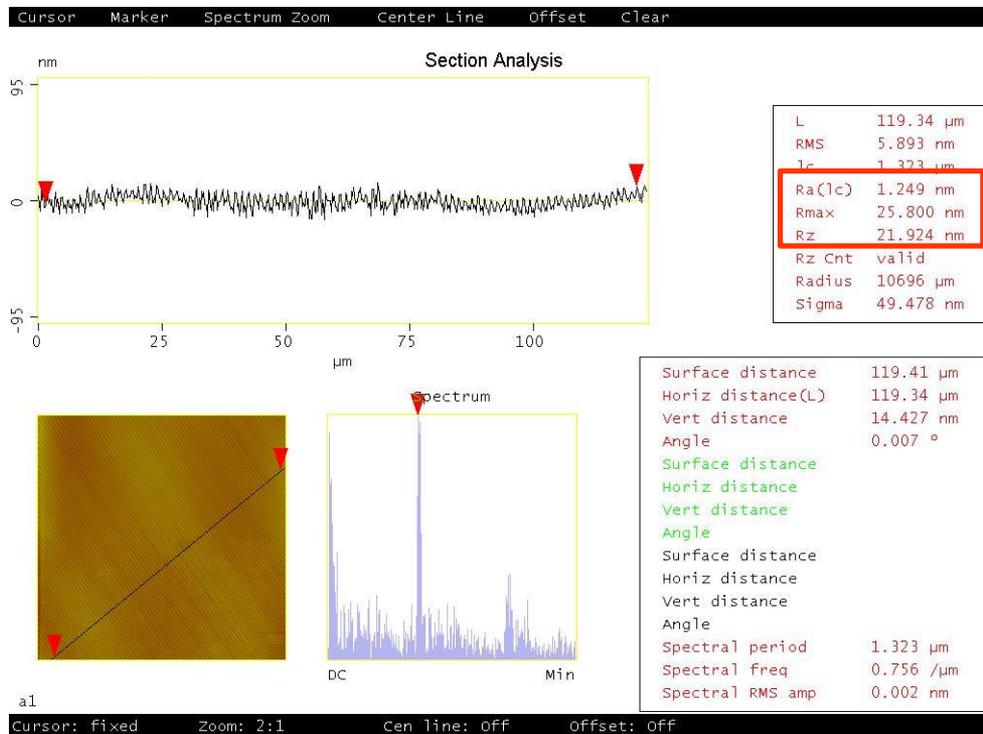
Ekkard Brinksmeier, and Werner Preuss Phil. Trans. R. Soc. A 2012;370:3973-3992

# BASE COMPARATIVA PARA DIMENSÕES

Torneamento de Ultraprecisão		Usinagem convencional (operações de torneamento)	
Avanço $f$	1 a 20 $\mu\text{m}/\text{rev}$	0.1 A 2 mm	
Profundidade de corte $a_p$	1 a 20 $\mu\text{m}$	0.1 a 10 mm	
Forças de corte $F$	< 1 a 5 N	>100 N	
Rugosidade $R_a$	2 a 20 nm	0.2 a > 5 $\mu\text{m}$	
Desvio de Forma	0.1 a 1 $\mu\text{m}$	> 10 $\mu\text{m}$	

## Torneamento de ultraprecisão

Processo usado na fabricação de superfícies espelhadas para sistemas ópticos que demandam acabamento na faixa de dezenas de nanômetros e exatidão de forma na faixa de sub- micrometros.



Elementos ópticos torneados com ferramentas de diamante e peças de precisão apresentando diferentes tipos de superfícies. (Acabamento na faixa de 1-10 nm  $S_a$ , com desvio de forma na faixa de 0,1 a 1  $\mu\text{m}$  P-V, dependendo do tamanho e forma da peça)

symmetrical surfaces	freeform surfaces	structured surfaces
moulds for plastic lenses	non-telecentric imaging systems	automotive lighting
IR optics	head-up displays	lens arrays
UV optics	LED lighting systems	prism arrays
CO <sub>2</sub> -laser mirrors	range finders	phase plates
ophthalmic lenses	F-theta lenses	Fresnel lenses
scanner polygons	flat panel backlight units	lab-on-a-chip

Ekkard Brinksmeier, and Werner Preuss *Phil. Trans. R. Soc. A* 2012;370:3973-3992

## INTRODUÇÃO

Existem dois elementos fundamentais que permitiram a evolução da usinagem mecânica na direção da mais alta exatidão:

- Controle da exatidão da máquina
- Controle da exatidão da ferramenta

*Erros de deslocamento de guias e eixos somente podem ser medidos e compensados caso eles seja repetitivos [Slocum, A. H. 1992 *Precision machine design*. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers.]*

## Torneamento de ultraprecisão - Histórico

Década de 60: primeiros desenvolvimentos

Demanda de áreas de C&T:

-Energia

- Componentes ópticos e mecânicos

-Eletrônica

- Defesa

### Fatos marcantes:

- Pesquisa sistemática das fontes de erros dos movimentos de máquina; erro no movimento de guias lineares menor do que  $0,5 \mu\text{m}$  ao longo de 300 mm.
- Desenvolvimento de eixos-árvore aerostáticos com alta precisão; erros de batida axial e radial menores do que 50 nm.

## Torneamento de ultraprecisão - Histórico

Década de 70: Demanda por componentes ópticos com formas complexas

Ex.: Formas anesféricas

Justificativas:

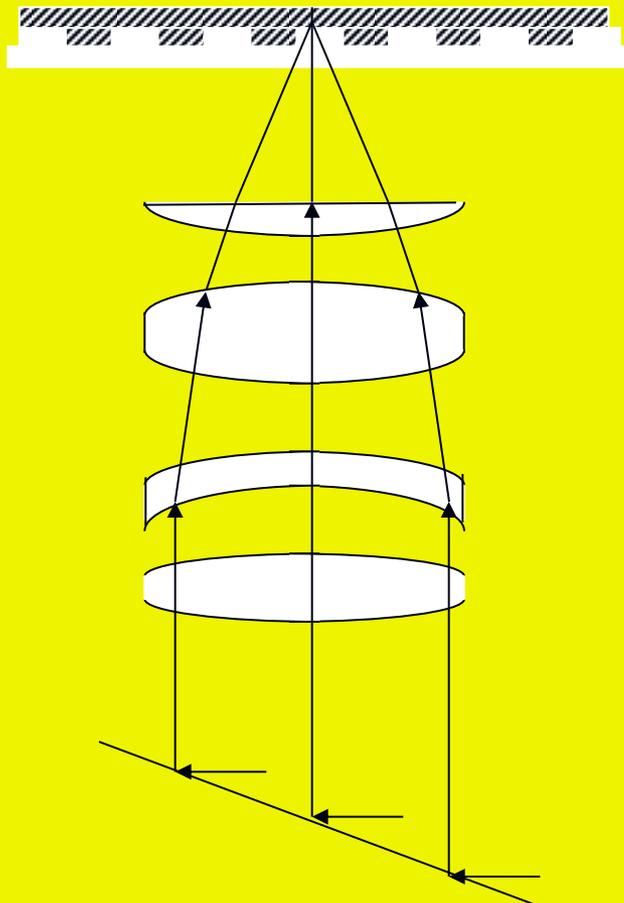
- Alta precisão
- Versatilidade
- Baixo custo de manufatura

### Fatos marcantes:

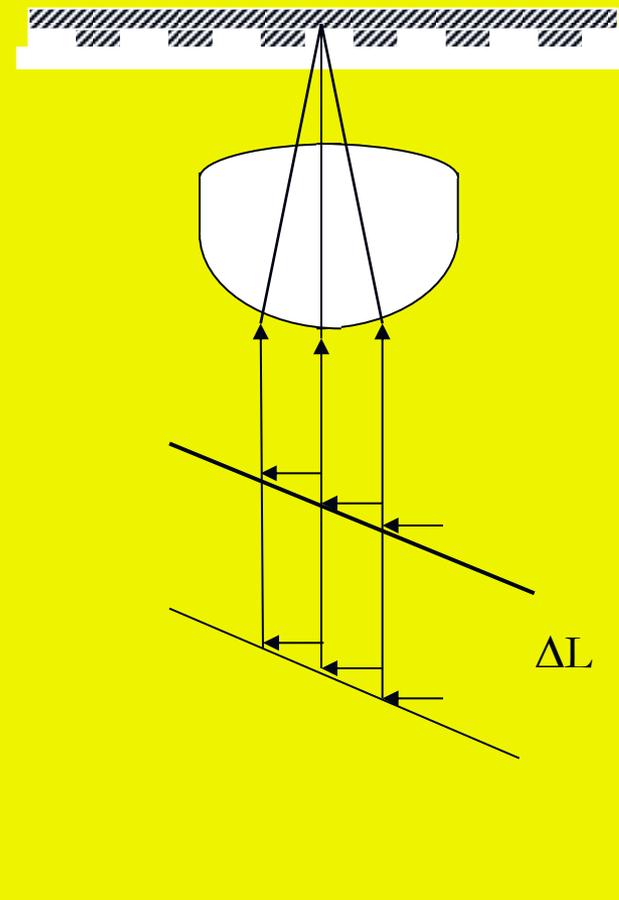
- Feedback de Encoder para controle de posicionamento menor do que 100 nm.
- Retificação e polimento de ferramentas de diamante com geometria definida; fabricação de ferramentas com raio com controle de ondulação da aresta, menores que 1  $\mu\text{m}$ .

# Sistema óptico

## Sistema de Lentes Esféricas



## Lente Anesférica



## Torneamento de ultraprecisão - Histórico

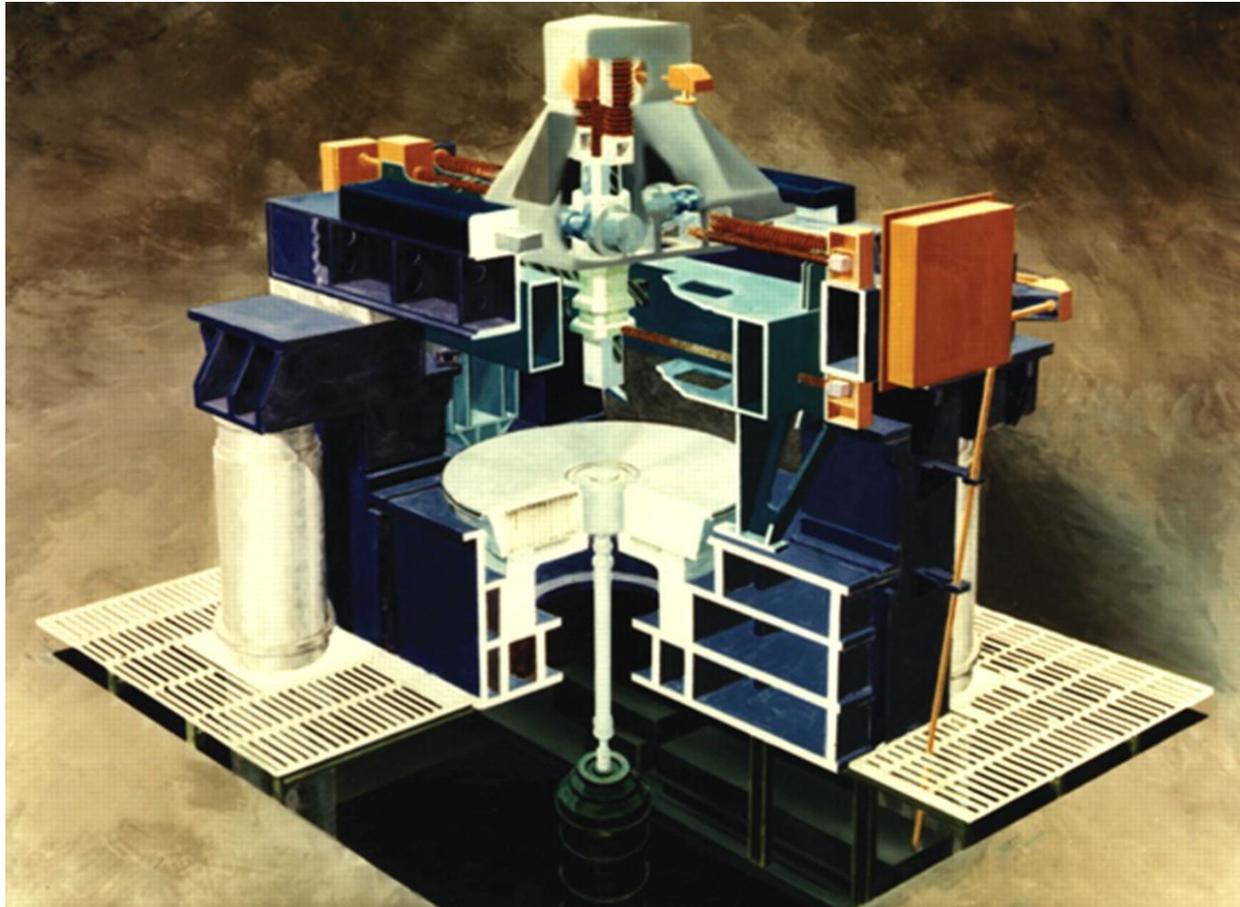
Década de 80: Desenvolvimento de instrumentos e equipamentos de ultraprecisão:

- Máquinas Ferramenta
  - Metrologia
    - Controle
      - Ferramentas de diamante

Fatos marcantes:

- Início da comercialização de peças usinadas com diamante.
- Introdução de interfereômetros laser para controle de precisão de posicionamento; resolução menor do que 10 nm.
- Implantação de CNC.
- Polimento mecânico e químico de raios de ferramentas com controle de ondulação menor que 0,1  $\mu\text{m}$ .

**Schematic of the vertical axis large optics diamond turning machine (courtesy of LLNL).**  
*contouring accuracy less than  $0,1 \mu\text{m}$  over  $812,8\text{mm}$  is supposed to be the most precise machine in the world*



## Torneamento de ultraprecisão - Histórico

**Década de 90:**

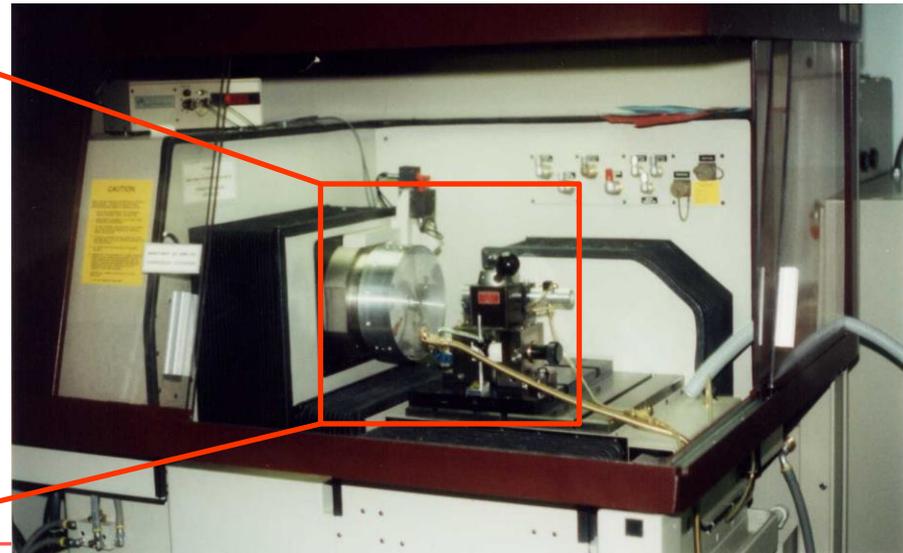
### Fatos marcantes:

- Introdução de escalas em vidro com interpolação eletrônica para controle de posição; resolução menor que 1 nm.
- Introdução de mancais hidrostáticos a óleo para guias lineares, erro no movimento menor que than 0,15  $\mu\text{m}$  em 300 mm.
- Introdução de máquinas multieixos para usinagem de formas livres
- Introdução de controle através de PC.
- Melhoria do controle do ambiente através do encapsulamento de máquinas em ar condicionado

## SEM-EESC-USP

### Máquina Ferramenta - ASG 2500

- **Resolução do Sistema:** 0.01  $\mu\text{m}$
- **Base em FoFo com *Isolamento de Vibração***
- **Árvore:** Mancais Aerostáticos
- **Rotação:** 100 a 2400 rpm
- **Guias:** Mancais Hidrostáticos
- **Curso:** X = 254 mm; Z = 152 mm; **Velocidade:** 0.25 a 760 mm/min
- **Dimensões da Peças:**  $\phi$  304 mm /Convexo 152 mm/ Côncavo 152mm



## Torneamento de ultraprecisão - Histórico

Anos 2000:

### Fatos marcantes:

- Introdução de torneamento com *fast tool servo* (FTS) e *slow slide servo* (SSS).
- Introdução de motores lineares para acionar guias lineares.
- Software customizado usinagem de formas livres.
- Desenvolvimento de polimento de arestas de diamante por feixe de ions (*Focused ion beam - FIB*) para formação de arestas de corte com formas não circulares.

Table 3. Evolution of commercially available diamond machining equipment [11].

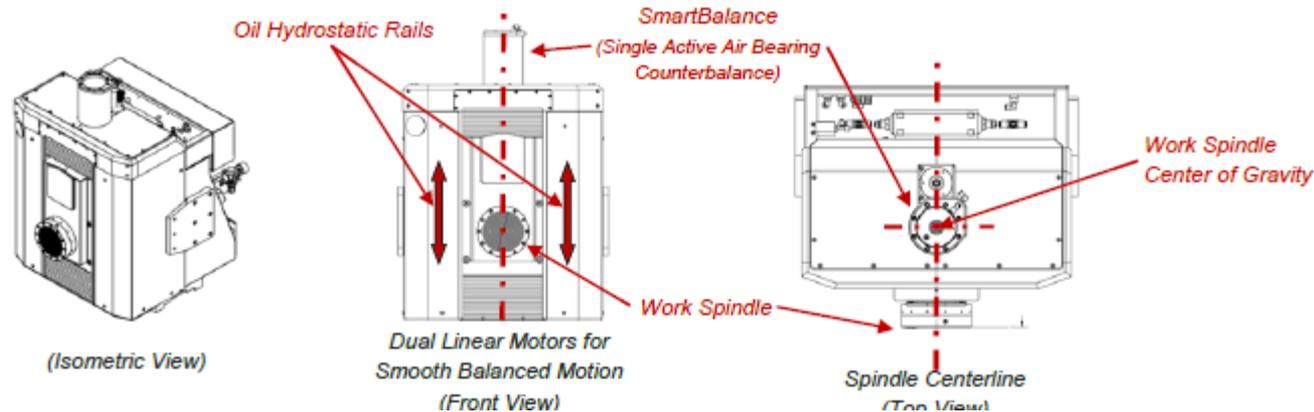
	1980	2000
machine base	cast iron or granite	granite or epoxy granite
slide ways air	bearing or rolling bearing	oil hydrostatic bearing
axis drives	lead screw and servo motor	linear motor
spindle bearing	porous graphite or orifice	orifice or groove compensated
spindle drive	belt drive	direct brushless DC motor
spindle feedback	none	encoder (resolution 0.1 arcsec)
positioning	laser interferometer (resolution 6 nm)	glass scale (resolution 0.6 nm)
controller	commercial CNC	PC-based controllers

## Commercially available diamond machining equipment

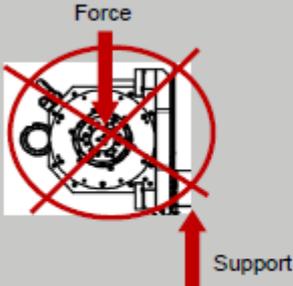


## Commercially available diamond machining equipment

### Nanotech's Y-Axis Design Follows Precision Engineering Principals of Symmetry



### Cantilever Design Practices Simply Can't Compete on a Performance Level

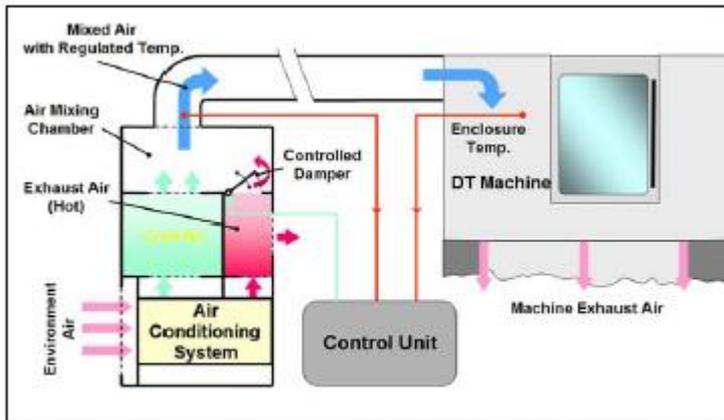


**No Substitute for Symmetry**

**Moment of Force**  
Large moment acting on a cantilevered spindle design. As weight is added to spindle, condition will worsen potentially requiring manual adjustments.

A **cantilever** is beam supported on only one end. The beam transfers the load to the support where it has to manage the moment of force and shear stress. Moment of force is the tendency of a force to twist or rotate an object.

## Commercially available diamond machining equipment



*Air Temperature Controller with NanoTEMP Thermal Monitoring System  
(records up to 16 channels)*



*Monolithic Composite Polymer Granite Base*

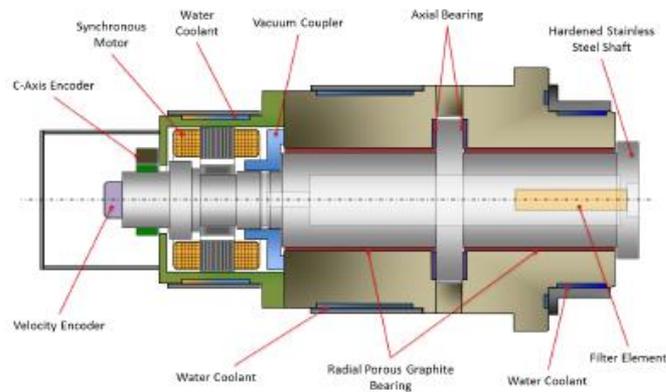
- **Granite Composite Base** — Monolithic composite polymer granite base with integral coolant troughs and counter mass for optimal engineered center of gravity and easy self drainage of flood coolants

## Porous Graphite Air Bearing Work Spindle!

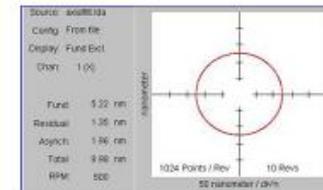
- Speed Range: **up to 10,000 RPM Bi-Directional**
- Axial / Radial guaranteed motion accuracy through entire speed range: **≤ 12.5nm**
- Radial Working Load Capacity (@nose): **85kg @ 7bar (185lbs @ 100psi)**  
(Defined at 60% of Ultimate Load Capacity) **102kg @ 10bar (225lbs @ 145psi)**
- Axial Working Load Capacity (@nose): **180kg @ 7bar (397lbs @ 100psi)**  
(Defined at 60% of Ultimate Load Capacity)
- Radial Stiffness: **130 N/μm @ 7bar (743,000 lbs/in @ 100psi)**
- Axial Stiffness: **438 N/μm @ 7bar (2,500,000 lbs/in @ 100psi)**

### Why Porous Graphite?

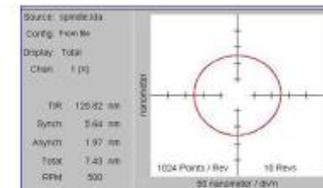
- High impact resistance offers superior protection compared to bronze journals
- Engineered for optimal air flow characteristics
- Proven robustness in numerous industrial applications
- Excellent lubricity by nature providing additional layer of protection



*Porous Graphite Impact Resistant Spindle  
with total liquid cooling technology  
for long term thermal stability*



**Axial Accuracy = 9.98nm**



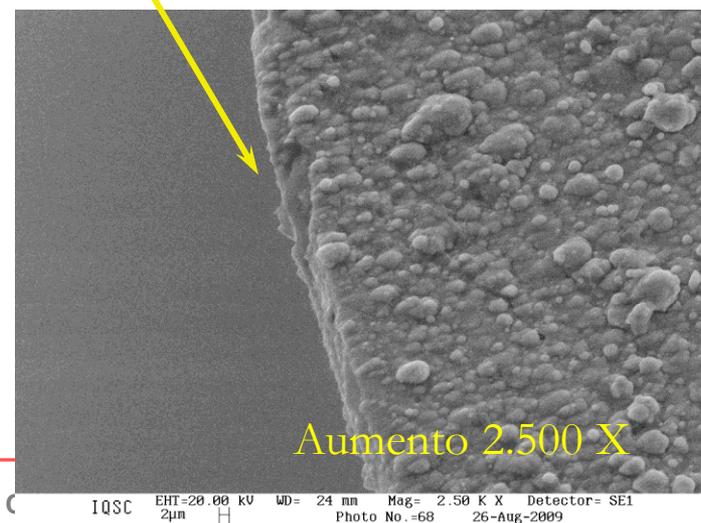
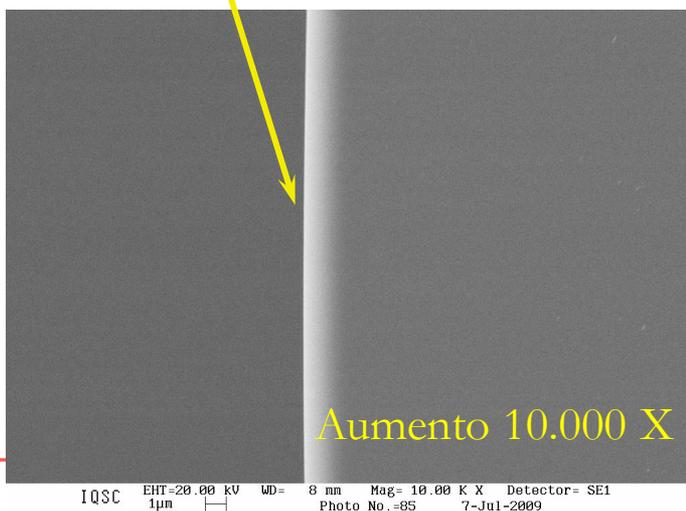
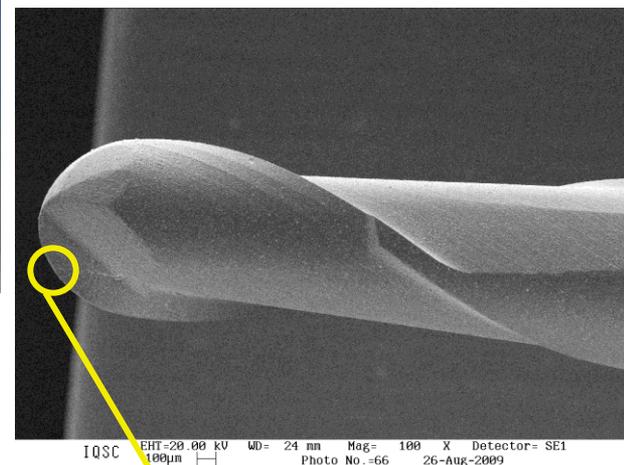
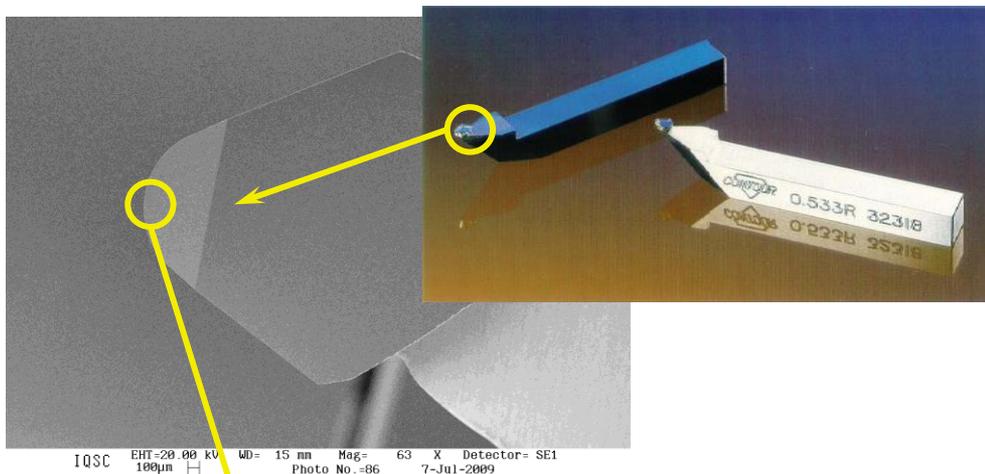
**Radial Accuracy = 7.43nm**

# Feramentas de Diamante Monocristalino Aresta de corte

Diamante

X

Metal Duro



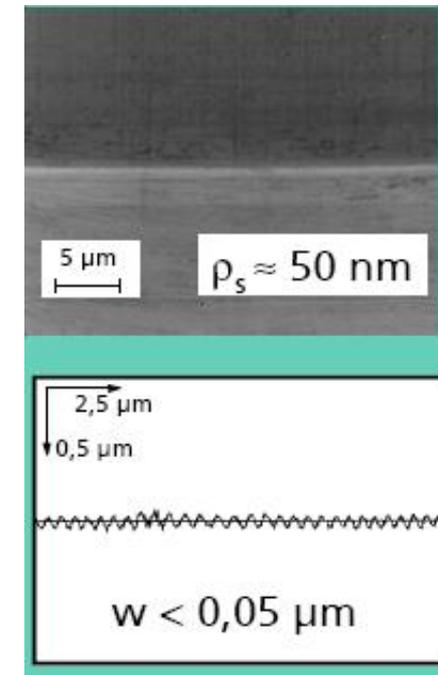
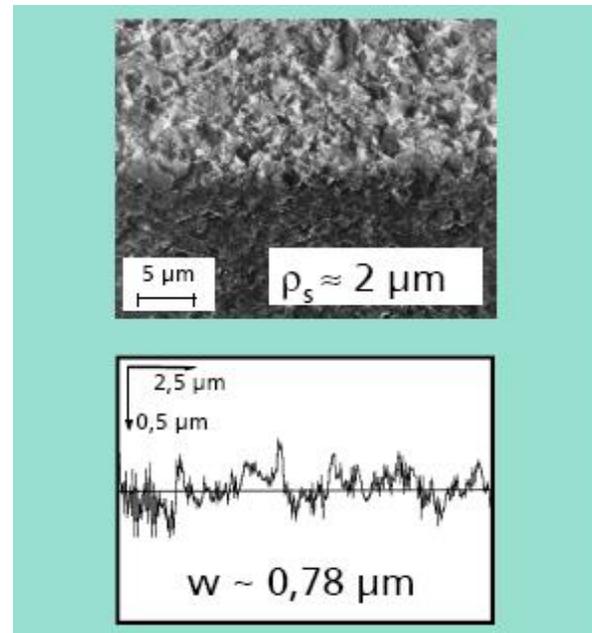
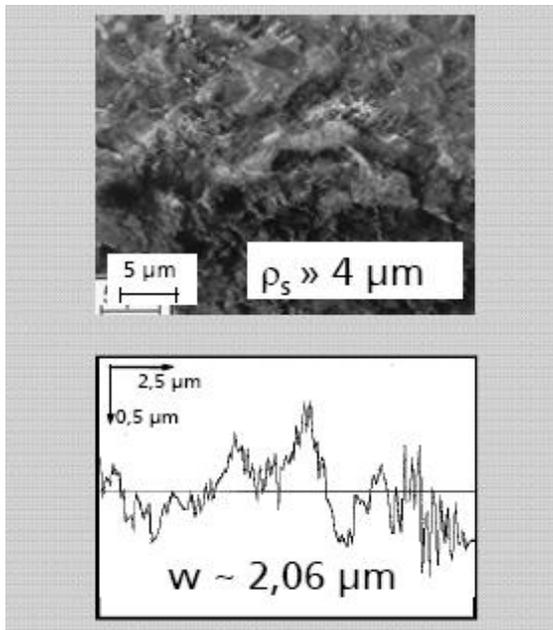
## Estrutura Monocristalina & Ondulação Controlada

MD

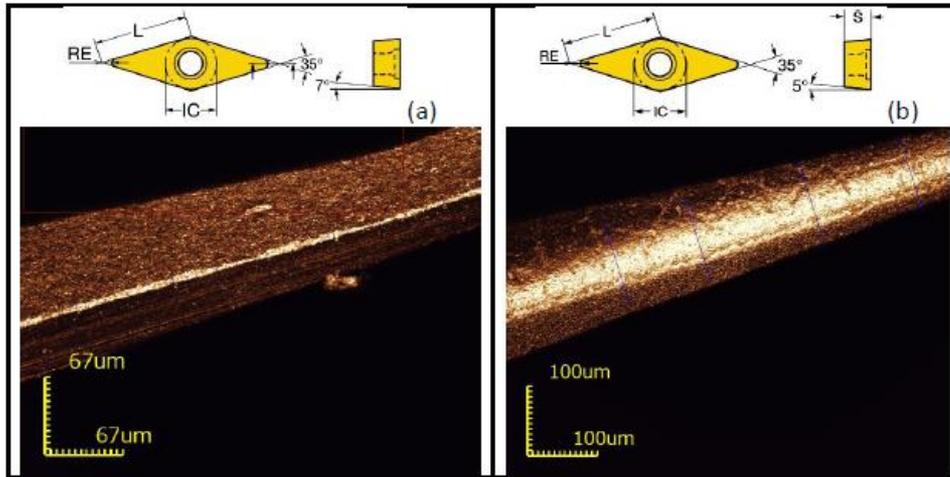
Material Policristalino  
grãos maiores

Material Policristalino  
grãos finos

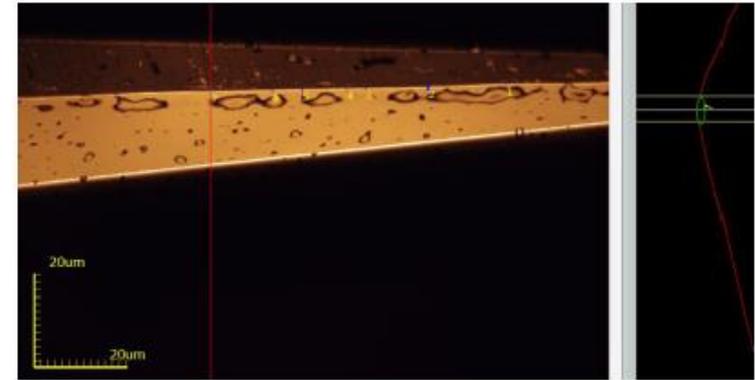
Diamante monocristalino



## Comparativo de resultados obtidos com insertos de Metal Duro e Diamante em alumínio micro grão e para aço GUF.



Geometria dos insertos de metal duro (a) utilizado para alumínio e (b) para aços.

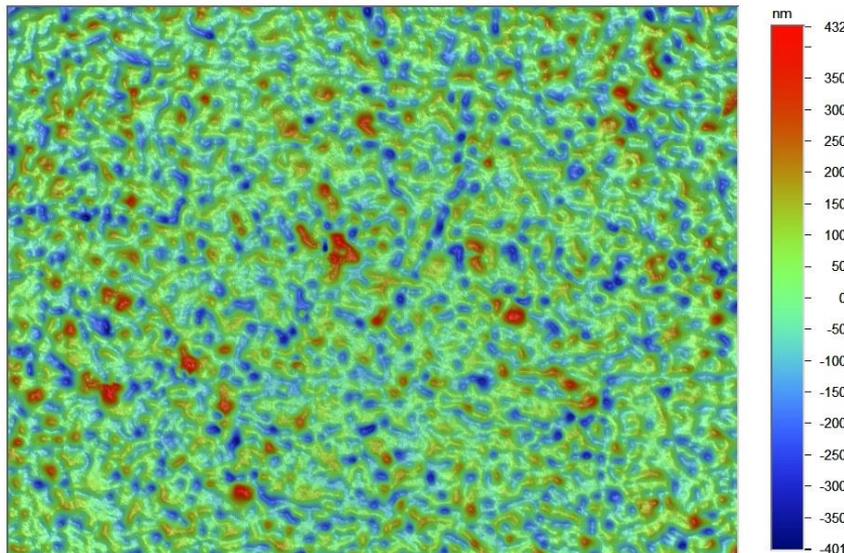


Medição do raio de aresta da ferramenta de diamante

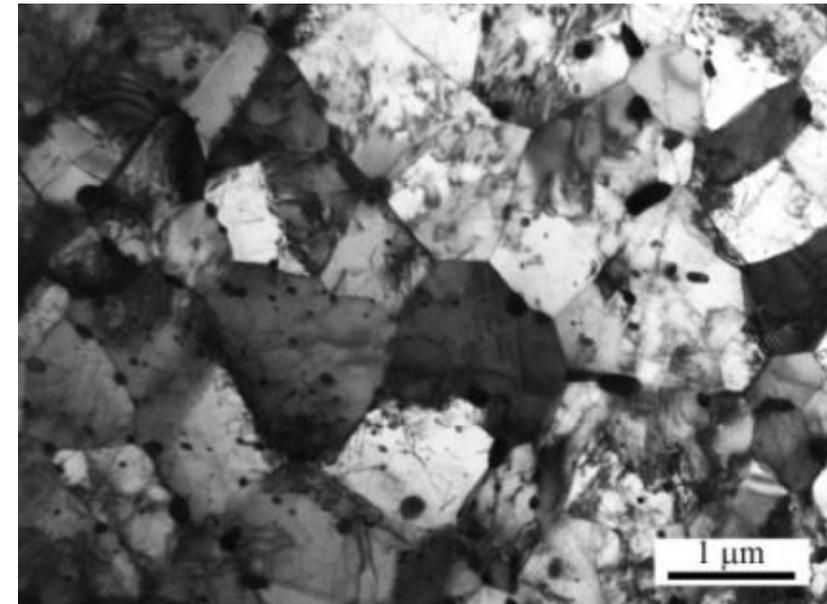
Tabela 3 - Raio de aresta das ferramentas utilizadas.

FERRAMENTA	RAIO DE ARESTA ( $r_e$ ) [ $\mu\text{m}$ ]
VCGX 11 03 02-AL H10	$4,512 \pm 0,842$
VBMT 11 03 02-MF 1125	$60,125 \pm 2,452$
S93314 Type 0.75mLG	$0,119 \pm 0,017$

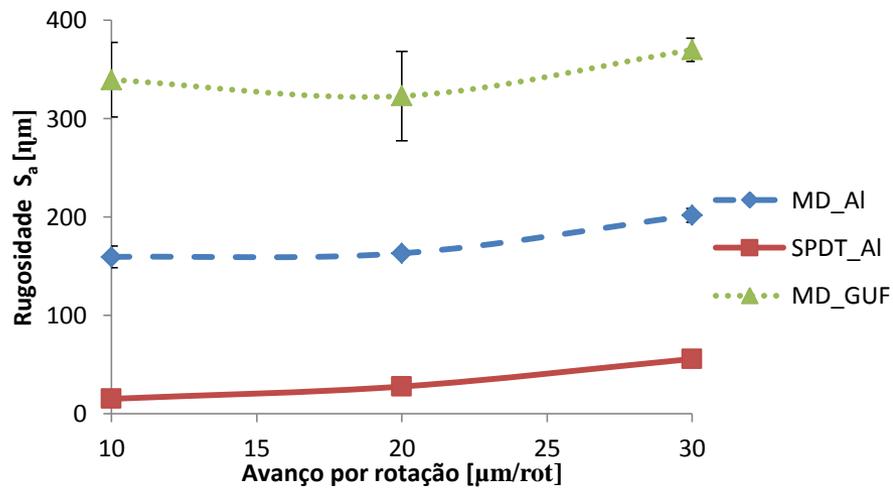
## Liga de Alumínio RSA6061 com micro grão e Aço GUF.



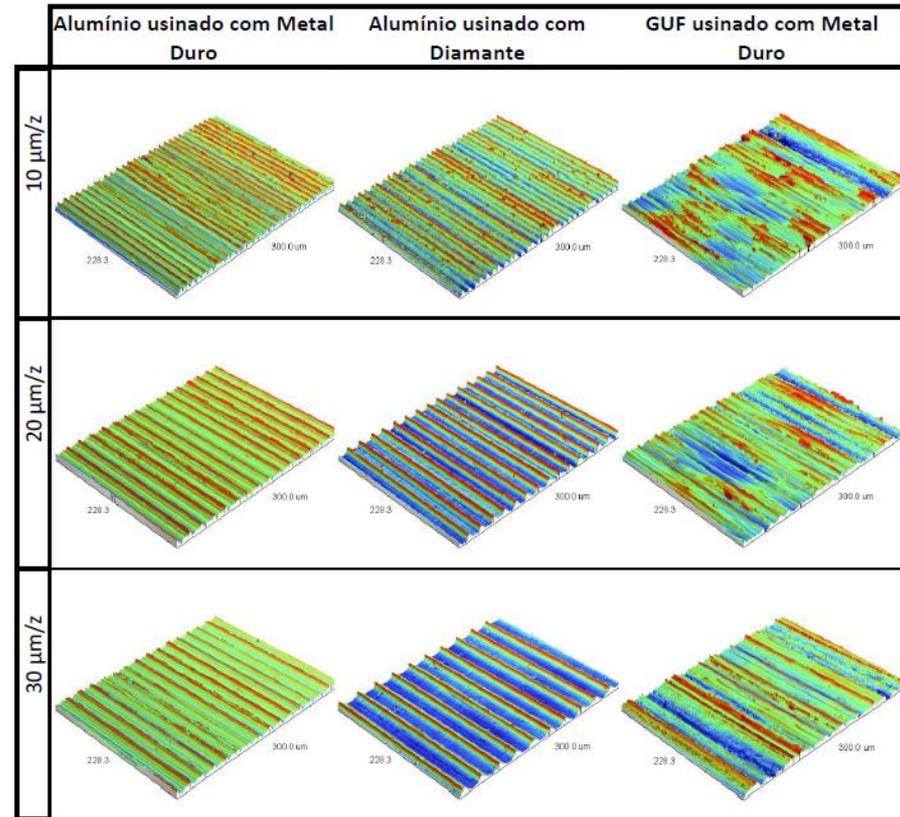
Micrografia do RSA 6061 grão ultrafino



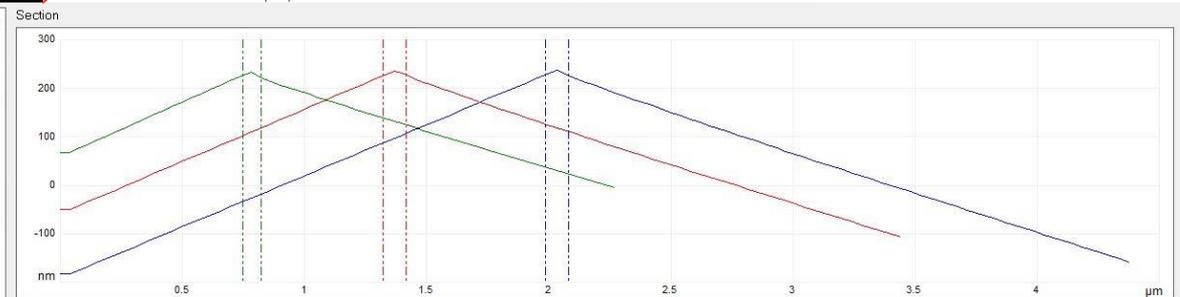
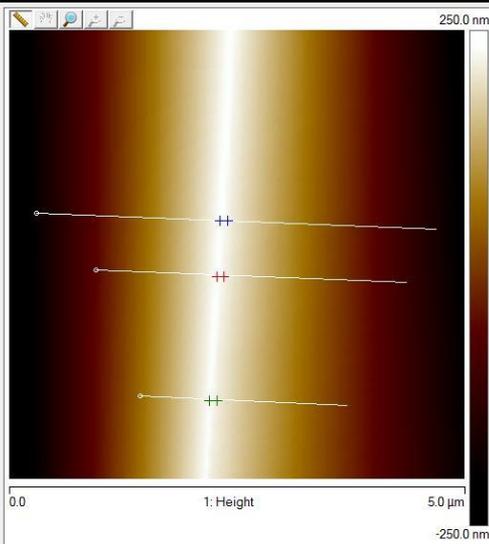
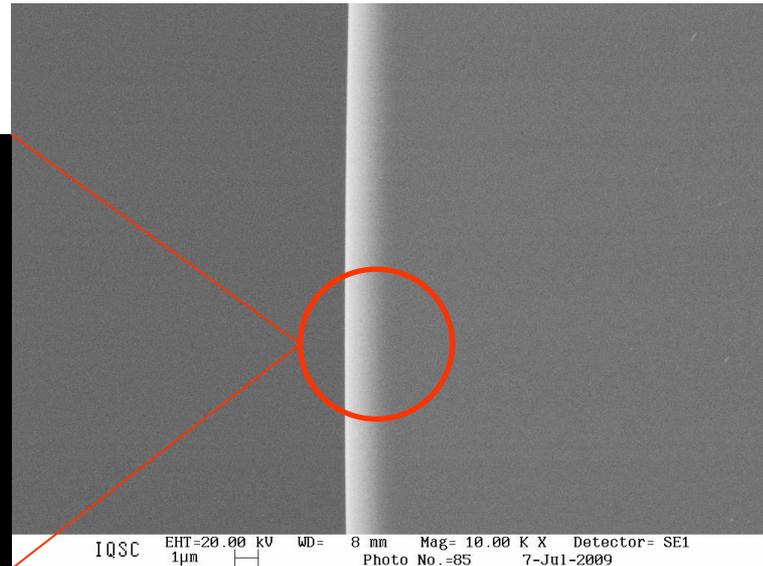
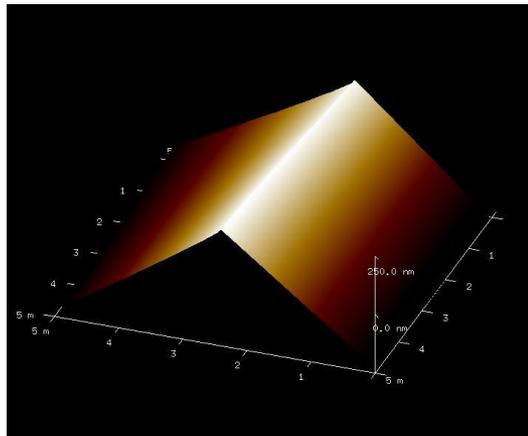
Micrografia do COS AR 60 grão ultrafino  
(Ataque Marshall seguido de Nital 1%)



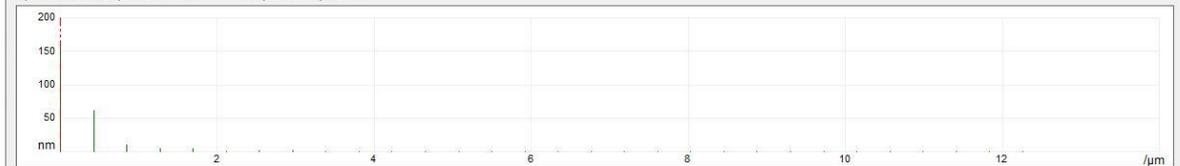
$S_a$  Rugosidade média para diferentes avanços por rotação.



# Aresta de Feramentas de Diamante Monocristalino medida através de AFM

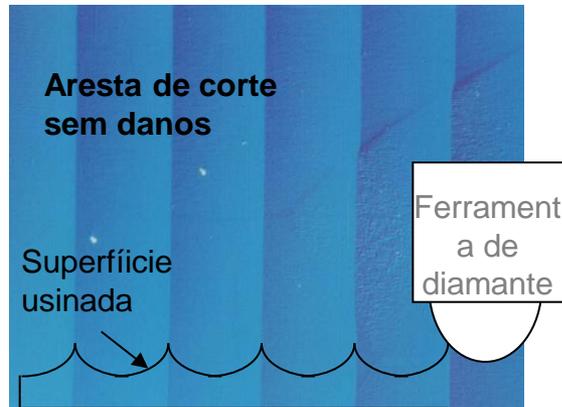


Spectral Period 0.00  $\mu\text{m}$  Spectral Frequency 0.00  $1/\mu\text{m}$   
Spectral RMS Amplitude 167 nm Temporal Freq: 0.00 Hz

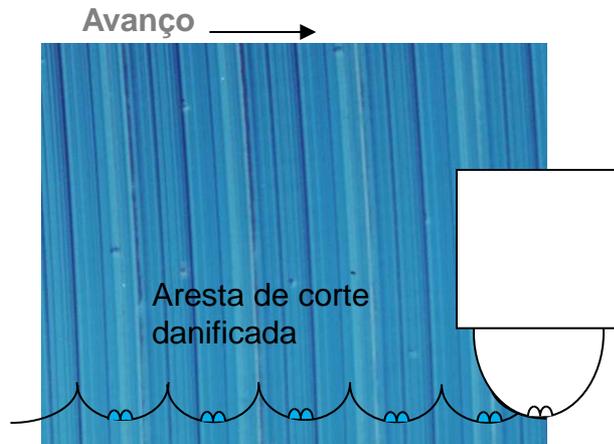


Pair	Horizontal Distance	Vertical Distance	Surface Distance	Angle	Rmax	Rz	Rz Count	Rms	Ra (Frequency Cutoff)	Frequency Cutoff	Radius	Radius Sigma
1	0.079 ( $\mu\text{m}$ )	-1.498 (nm)	0.081 ( $\mu\text{m}$ )	-1.089 ( $^\circ$ )	9.384 (nm)	0.000 (nm)	0.000	4.738 (nm)	204.323 (nm)	0.223 ( $\mu\text{m}$ )	0.091 ( $\mu\text{m}$ )	0.376 (nm)
2	0.079 ( $\mu\text{m}$ )	2.448 (nm)	0.080 ( $\mu\text{m}$ )	1.779 ( $^\circ$ )	9.741 (nm)	0.000 (nm)	0.000	4.864 (nm)	149.904 (nm)	0.000 ( $\mu\text{m}$ )	0.111 ( $\mu\text{m}$ )	0.069 (nm)
3	0.079 ( $\mu\text{m}$ )	-4.924 (nm)	0.082 ( $\mu\text{m}$ )	-3.574 ( $^\circ$ )	11.191 (nm)	0.000 (nm)	0.000	5.122 (nm)	86.990 (nm)	0.000 ( $\mu\text{m}$ )	0.077 ( $\mu\text{m}$ )	0.026 (nm)

## Inperfeições na Aresta



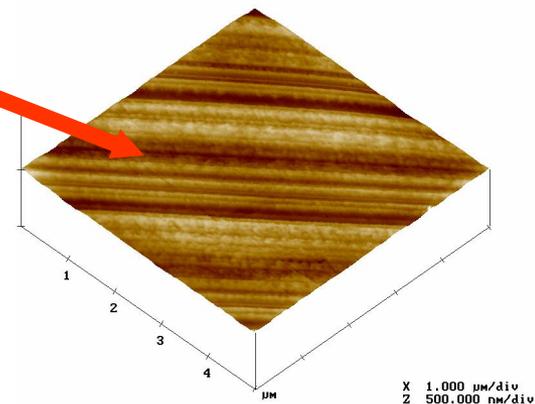
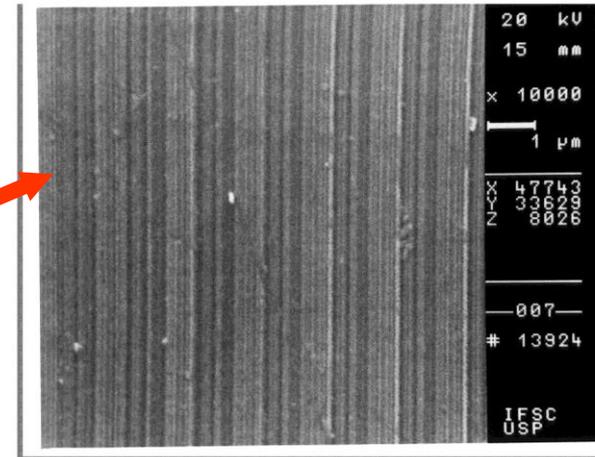
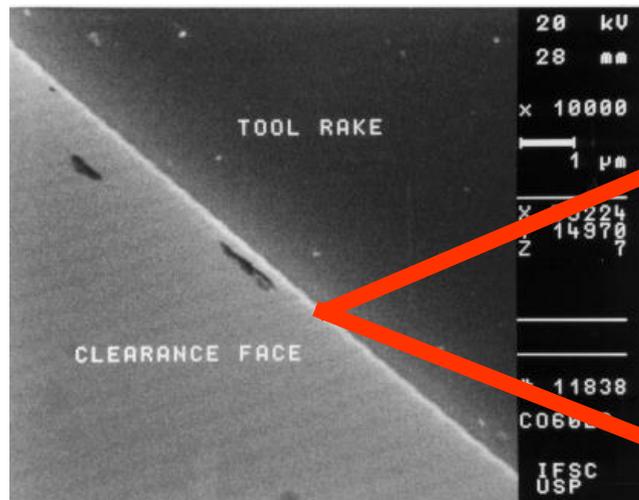
Avanço:  $f = 50 \mu\text{m}/\text{rev}$   $a_p = 20 \mu\text{m}$   
Material Liga Al-Mg.  $R_{p-v} = 0,205 \mu\text{m}$



Avanço:  $f = 50 \mu\text{m}/\text{ver}$   $a_p = 20 \mu\text{m}$ .  
Material Liga Al-Mg.  $R_{p-v} = 0,205 \mu\text{m}$

## Efeito do desgaste das ferramentas de diamante

### Usinagem de Si





Elementos ópticos torneados com ferramentas de diamante e peças de precisão apresentando diferentes tipos de superfícies. (Acabamento na faixa de 1-10 nm  $S_a$ , com desvio de forma na faixa de 0,1 a 1  $\mu\text{m}$  P-V, dependendo do tamanho e forma da peça)

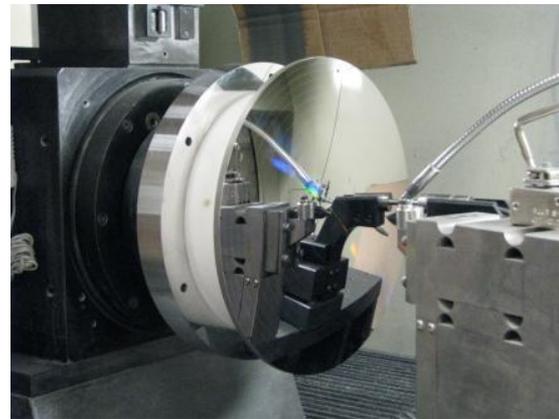
symmetrical surfaces	freeform surfaces	structured surfaces
moulds for plastic lenses	non-telecentric imaging systems	automotive lighting
IR optics	head-up displays	lens arrays
UV optics	LED lighting systems	prism arrays
CO <sub>2</sub> -laser mirrors	range finders	phase plates
ophthalmic lenses	F-theta lenses	Fresnel lenses
scanner polygons	flat panel backlight units	lab-on-a-chip

Ekkard Brinksmeier, and Werner Preuss *Phil. Trans. R. Soc. A* 2012;370:3973-3992

## Materiais Usináveis com ferramentas de diamante

Principais materiais usinados Ligas de alumínio e Cobre e ligas de cobre.  
Não necessitam de pós processamento.

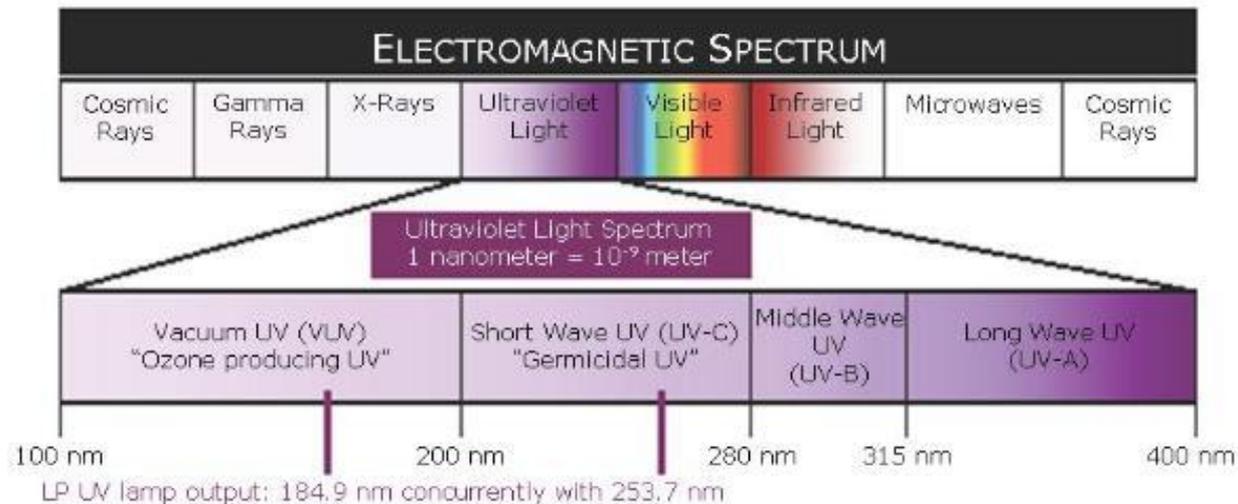
Aplicação: Óptica de Reflexão



## Materiais Usináveis com ferramentas de diamante

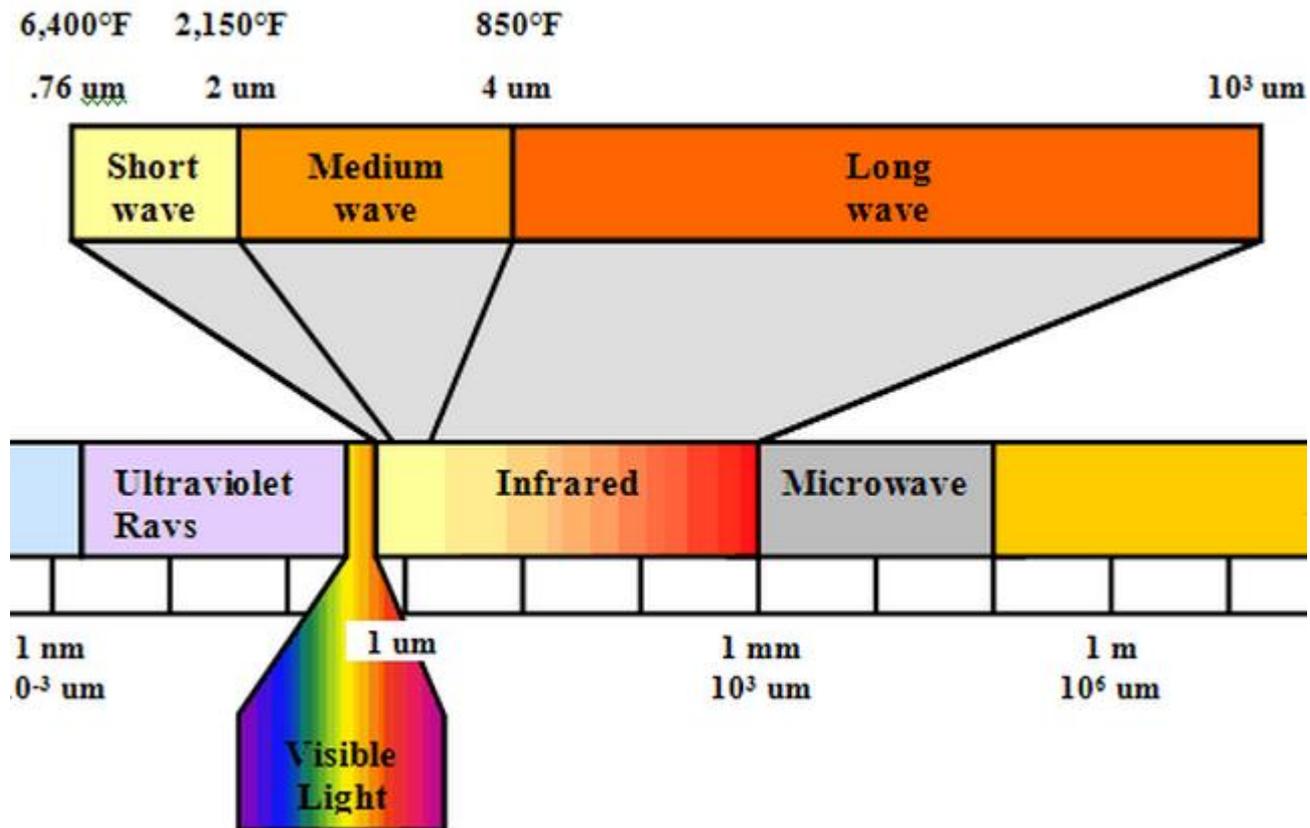
### Cristais semicondutores – Transmissão

#### UV Optics



## Materiais Usináveis com ferramentas de diamante Cristais semicondutores – Transmissão

### IR Optics

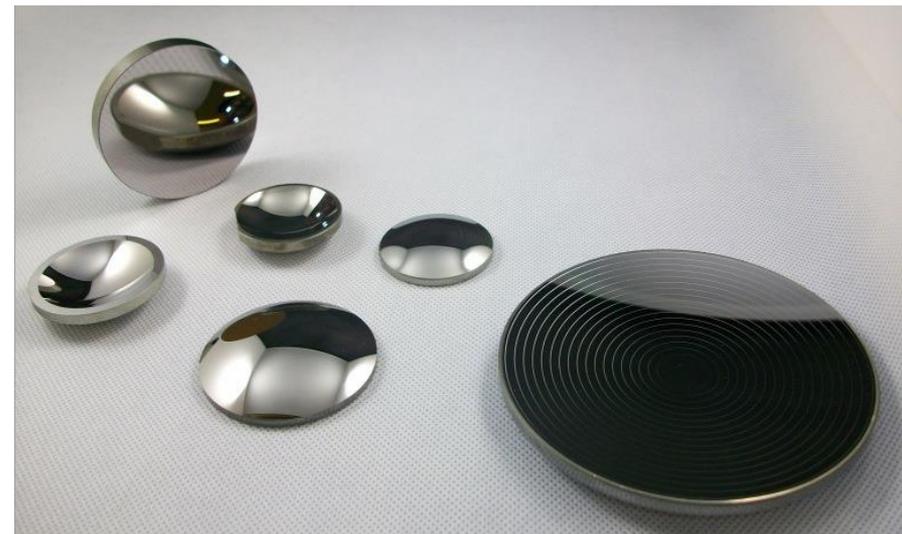
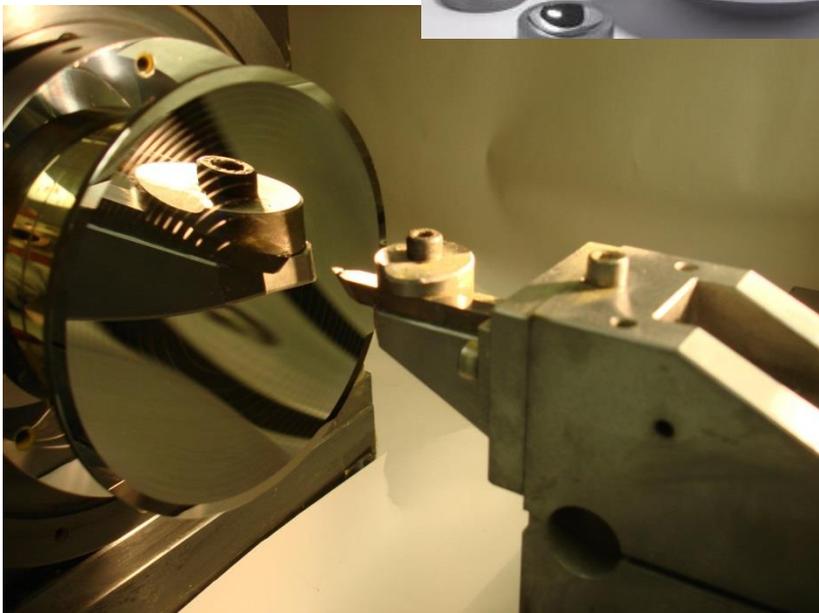
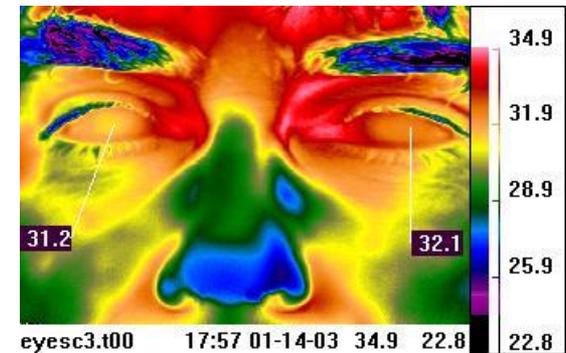
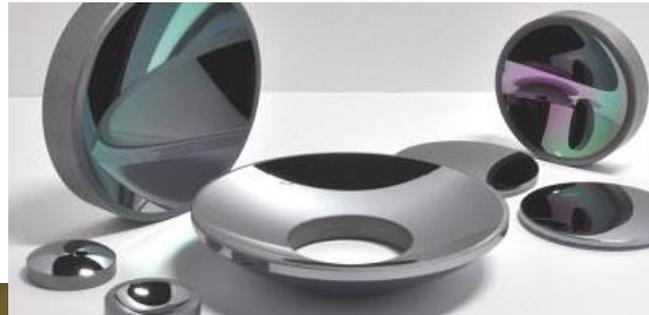


## Materiais Usináveis com ferramentas de diamante

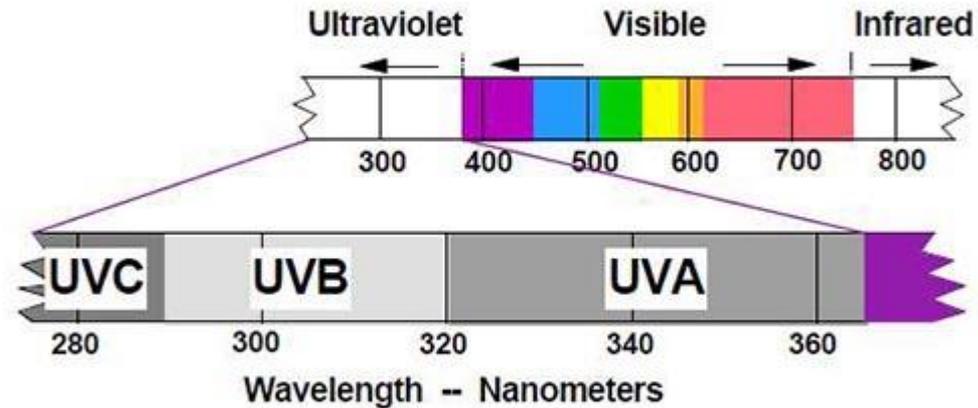
### Cristais semicondutores Si e Ge – Transmissão



IR optics



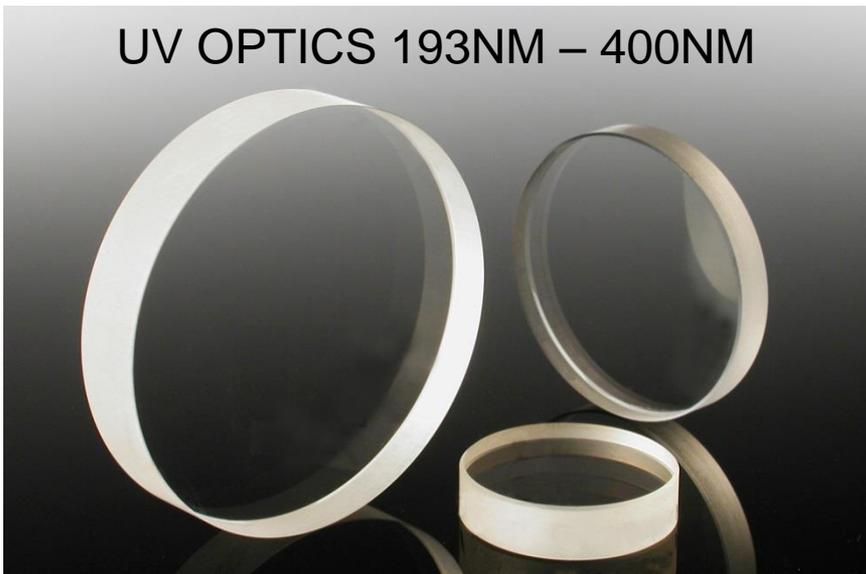
## ULTRAVIOLET SPECTRUM



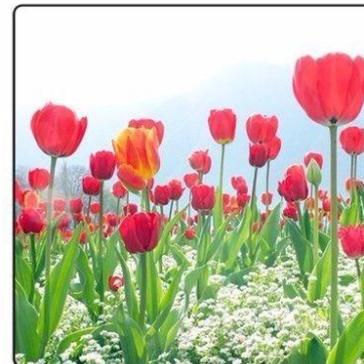
**Figure 1** Diagram showing ultraviolet portion of solar spectrum.

*Courtesy of Colorado State University, UV-B Monitoring and Research Program which is funded by the USDA*

### UV OPTICS 193NM – 400NM



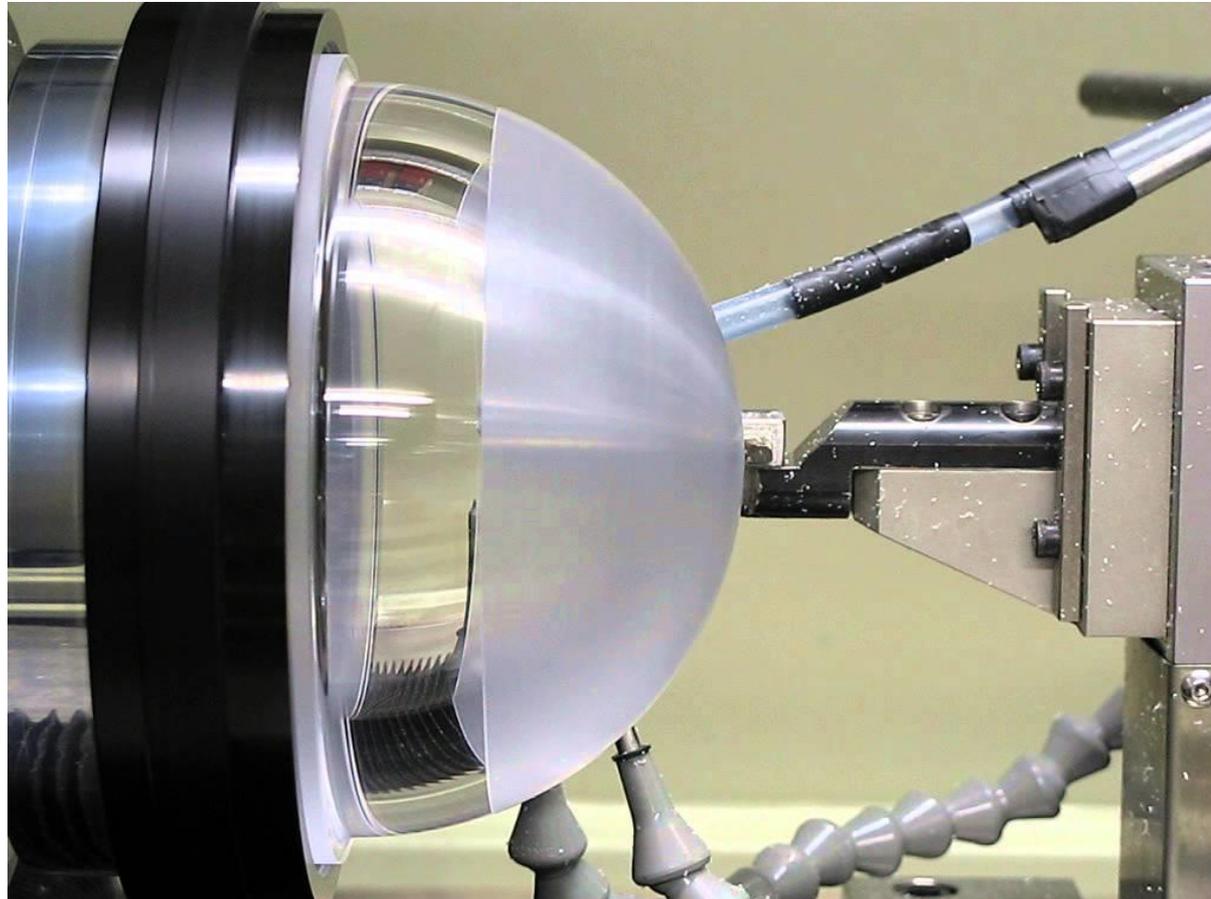
WITHOUT UV FILTER



WITH UV FILTER



## Materiais Usináveis com ferramentas de diamante Materiais Poliméricos PC, PMMA, etc.– Transmissão



## Aspectos Críticos na Usinagem de Materiais Metálicos Policristalinos

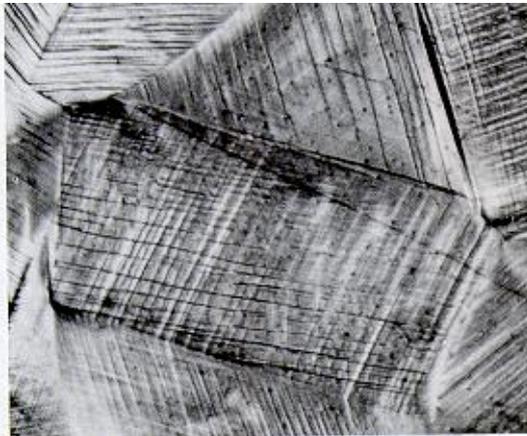
Materiais Metálicos Policristalinos em usinagem convencional são considerados:

- Isotrópicos,
- contínuo e;
- homogêneo

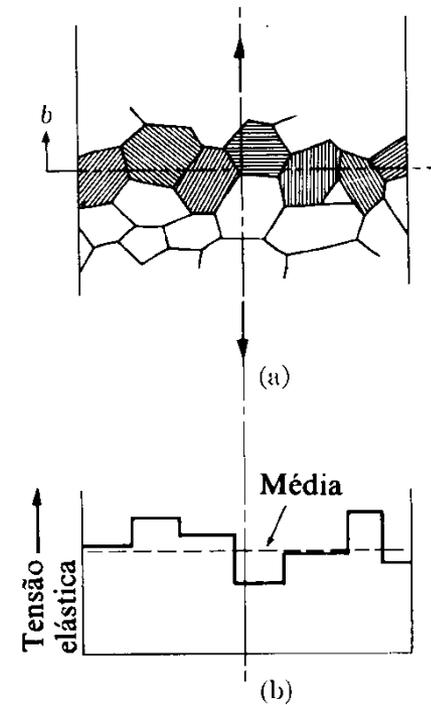
Portanto são tratados como uma série de monocristais com orientações cristalográficas aleatórias e propriedades anisotrópicas em usinagem de ultraprecisão

Esta anisotropia pode ser responsável por mudanças no comportamento dinâmico do processo de corte, i.e., quando a aresta da ferramenta passa de um cristal para outro, diferentes propriedades mecânicas se iniciam a partir do contorno de grão.

## Aspectos Críticos na Usinagem de Materiais Metálicos Policristalinos



Linhas de escorregamento na superfície de uma amostra de cobre policristalino, polida e em seguida deformada.



Heterogeneidades de tensões.  
Tensões elásticas variam com  
a orientação do grão

## Aspectos Críticos na Usinagem de Materiais Metálicos Policristalinos

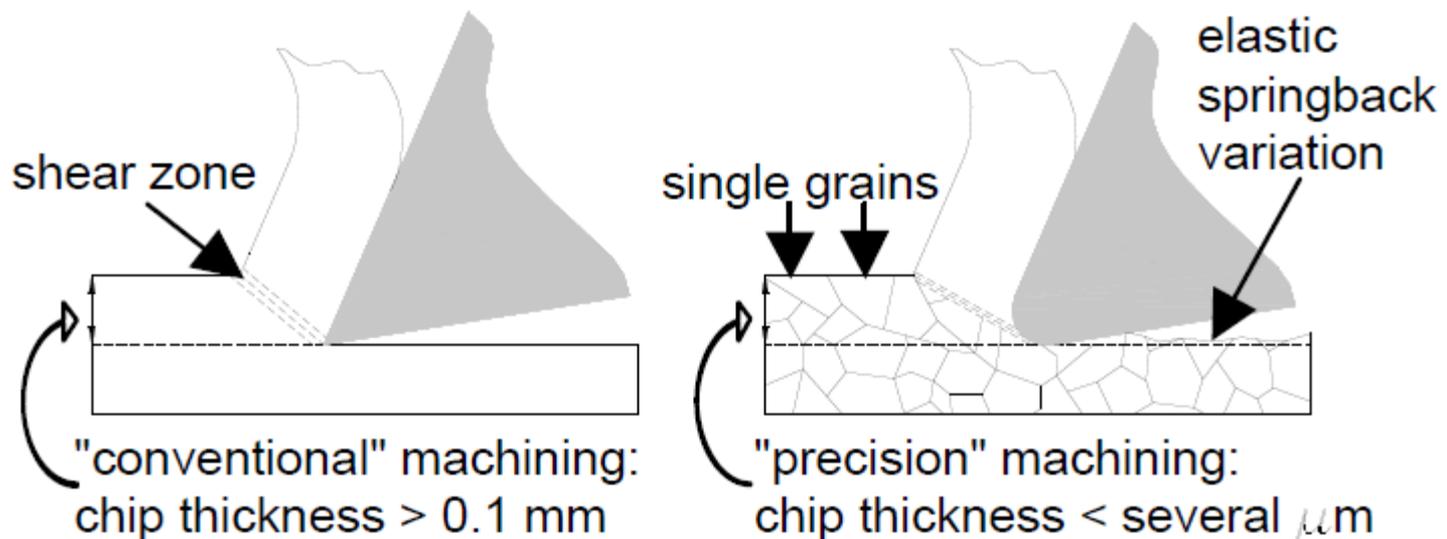


Amostra de Cobre eletrolítico endentado a) polido b) polido e atacado

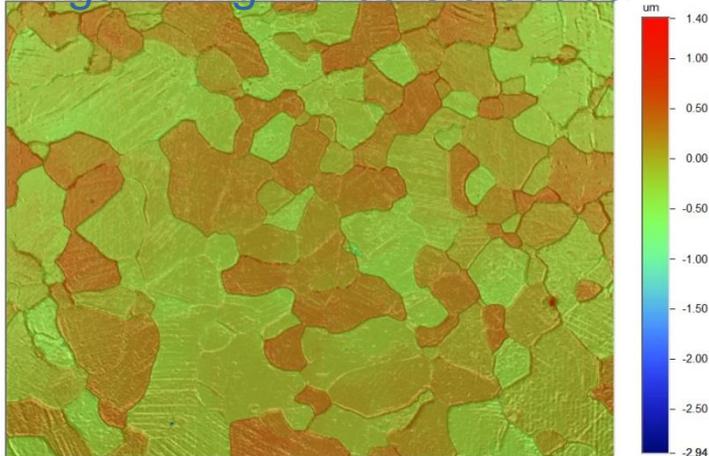
## Aspectos Críticos na Usinagem de Materiais Metálicos Policristalinos

Na usinagem de ultraprecisão, as condições de usinagem típicas de avanço e profundidade usinagem são de 5-15  $\mu\text{m}/\text{rev}$  e 1-10  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

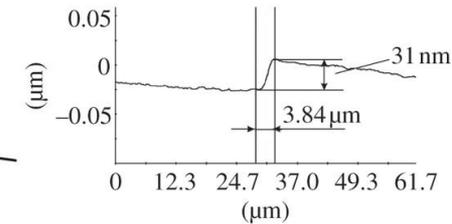
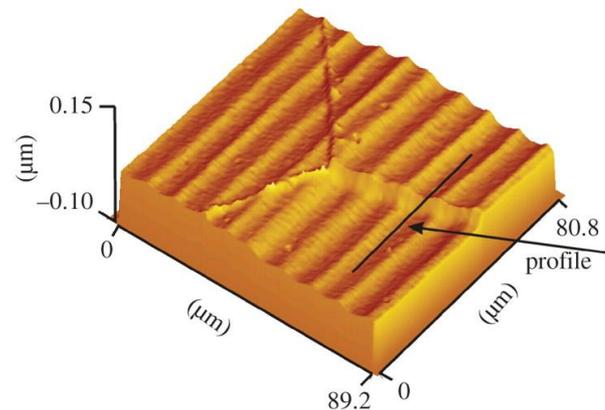
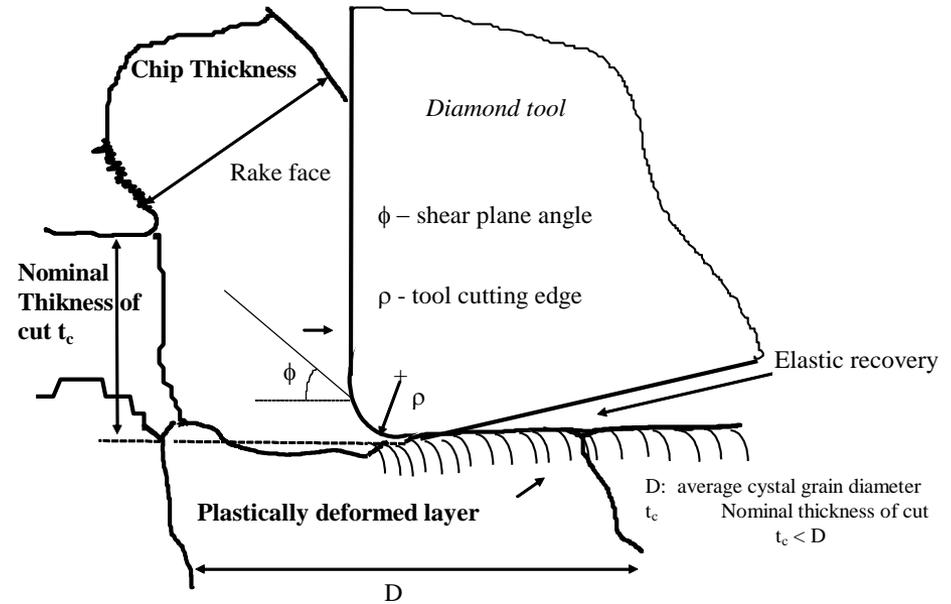
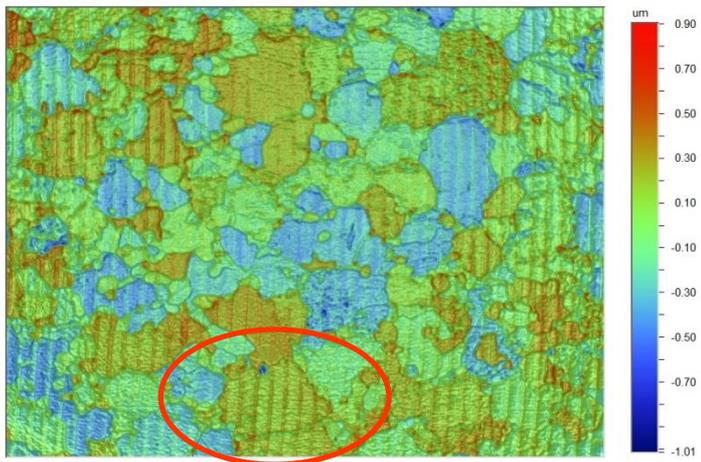
Na usinagem de metais policristalinos, a seção transversal do cavaco gerado encontra-se no domínio de um único grão como mostra a Fig. 1 (a) e (b), uma vez que as dimensões de corte são muito menores que o tamanho médio dos grãos. É possível que um único grão apresente vários passos da



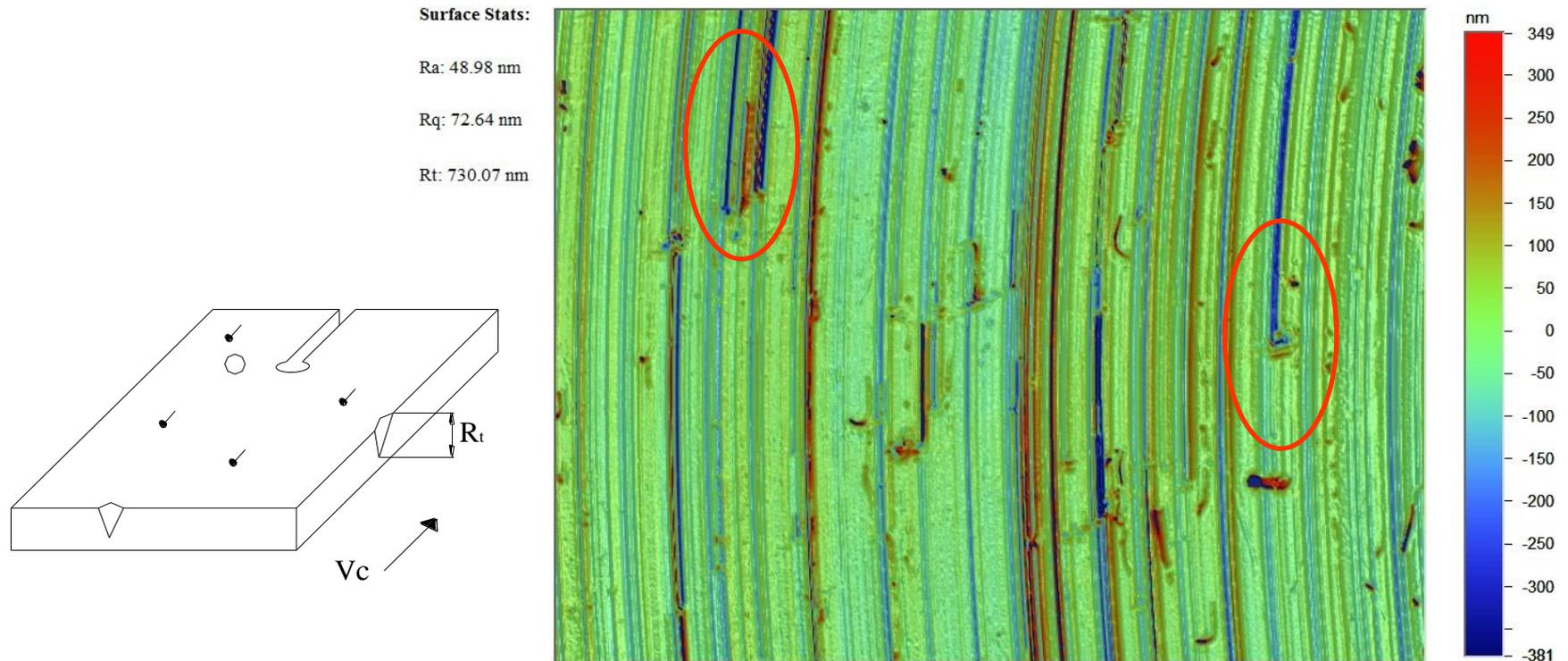
## Liga Al-Mg Polida e atacada



## Liga Al-Mg Torneada e atacada

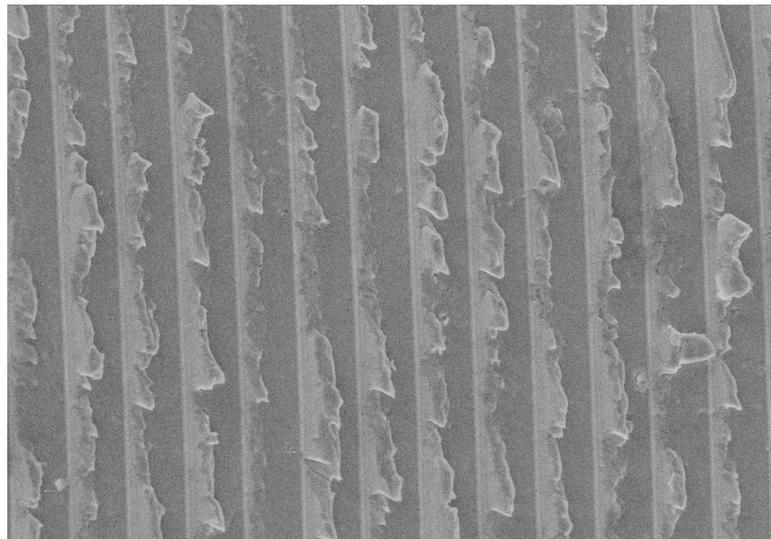


## Aspectos Críticos na Usinagem de Materiais Metálicos Policristalinos



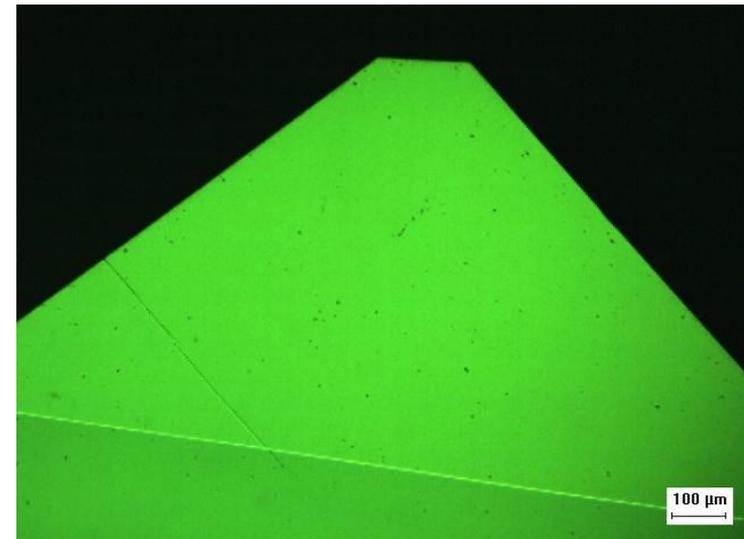
Inclusões duras na matriz – Al 7075 T6

## Materiais Metálicos policristalinos



IQSC EHT=20.00 kV WD= 25 mm Mag= 2.00 K X Detector= SE1  
3µm H Photo No.=3 25-Mar-2008

*Rebarbas geradas na torneamento com  
ferramenta de diamante em latão*

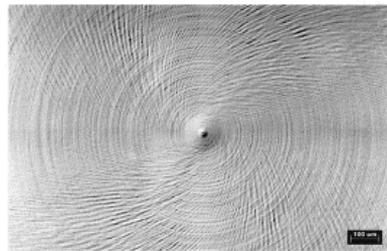


100 µm

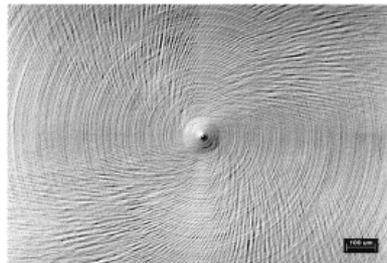
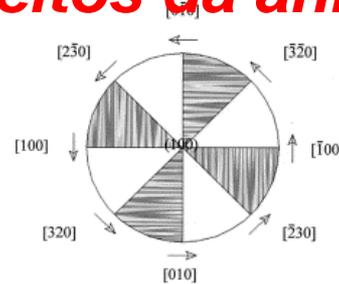
*Geometria da Ponta da  
ferramenta diamante usada*

# Materiais Monocristalinos

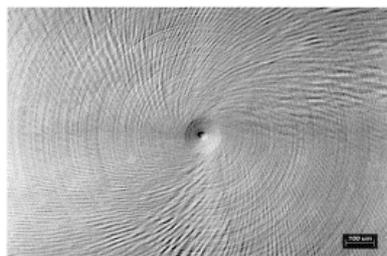
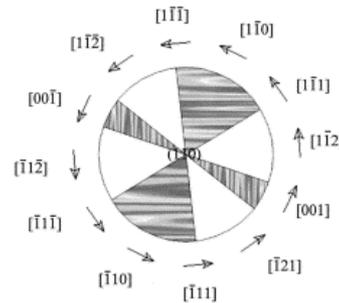
## Efeitos da anisotropia



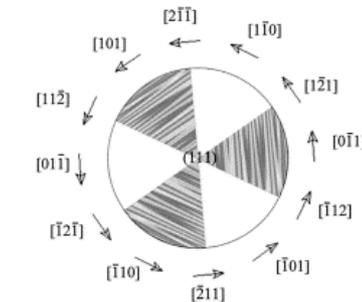
(a)



(b)



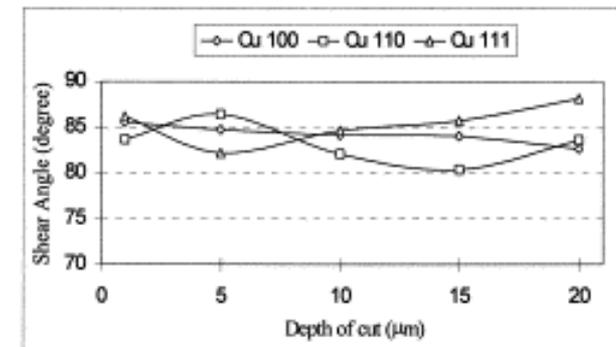
(c)



Monocristais de Cobre usinados com ferramenta de diamante. (a) (100); (b) (110); (c) (111)

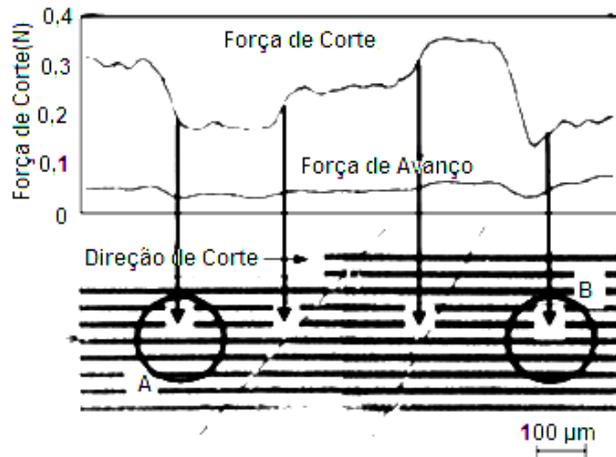
Esta anisotropia pode ser explicada pela mudança de direção que a ferramenta tem durante o corte em operação de faceamento.

A figura abaixo mostra variação de  $\phi$  em função de  $ap$ .

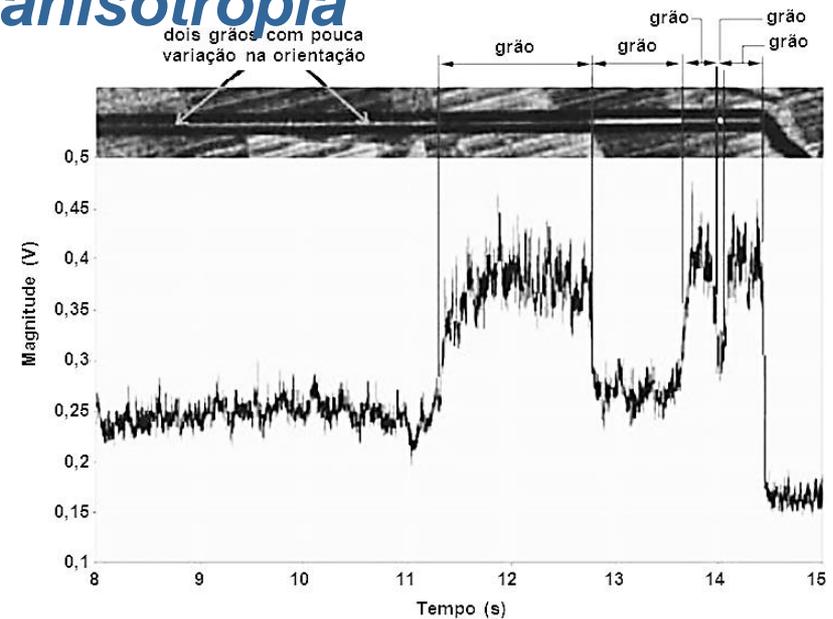


# Materiais Policristalinos

## Efeitos da anisotropia



Varição da Força de Corte correspondente a o contorno de grão de liga alumínio. (Modificado de Furukawa e Moronuki, 1988)



Sinal resposta de Emissão Acústica para a orientação de grão e contorno de grão em profundidade usinagem de 4 μm. (Modificado de Lee, Chang e Dornfeld, 2000)

- 1) Furukawa, Y. & Moronuki, N. (1988). Effect of Material Properties on Ultra Precise Cutting Processes, **CIRP Annals**, 37, pp.113-116.
- 2) Lee, Y., Chang, A. & Dornfeld, D.A. (2000). Acoustic Emission Monitoring for Diamond Machining of OFHC Copper, **International Conference on Precision Engineering (ICOPE)**, Singapore, pp. 323-332.

## Materiais PoliCristalinos e Monocristalinos

### Efeitos da anisotropia

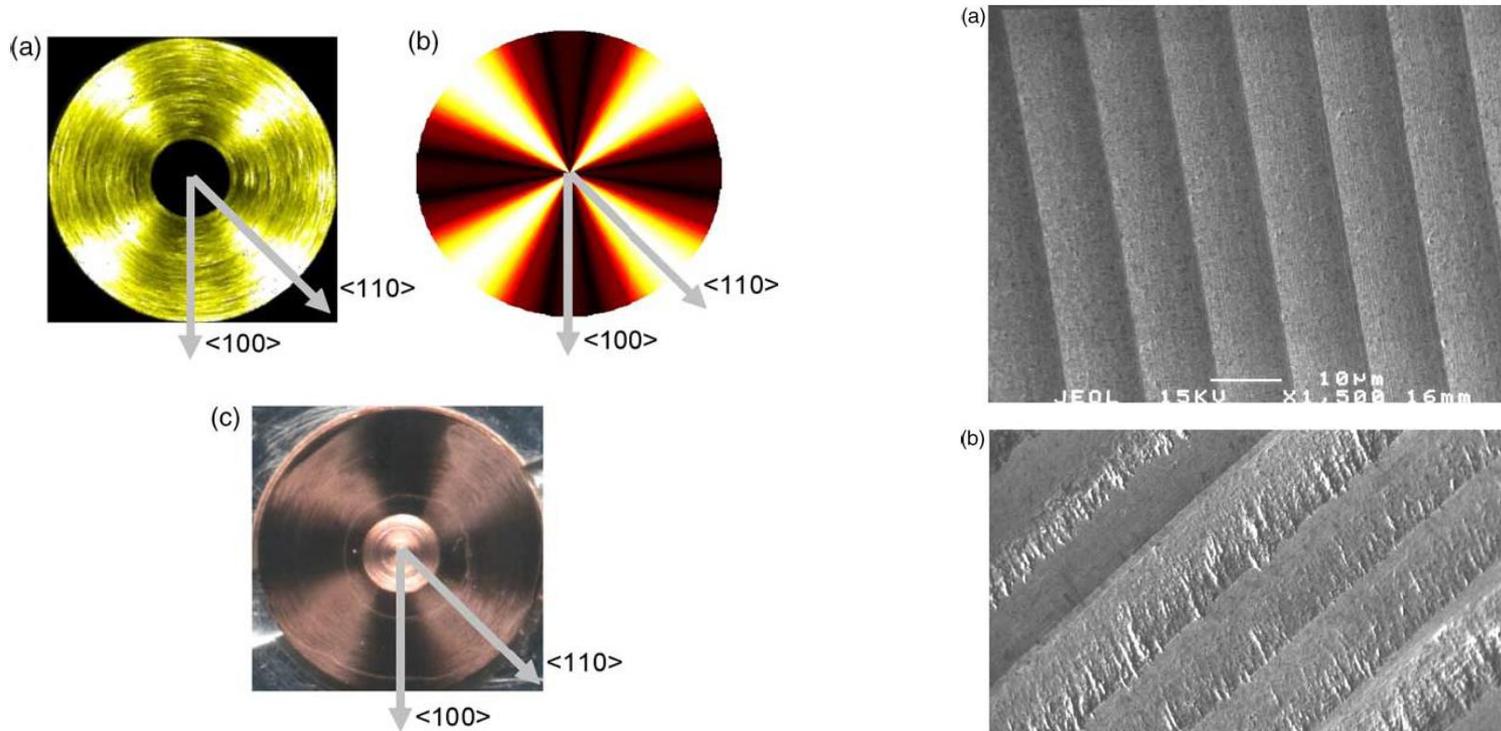


Fig. 15. (a) Experimental AE RMS polar map for  $\langle 100 \rangle$  workpiece. (b) Taylor factor-based theoretical AE RMS polar map for  $\langle 100 \rangle$  workpiece. (c) Chemically etched surface of  $\langle 100 \rangle$  workpiece after machining.

D.E. Lee, I. Hwang, C.M.O. Valente, J.F.G. Oliveira, D.A. Dornfeld. Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission. *Int. J. of Machine Tools & Manufacture* 46 (2006) 176–188

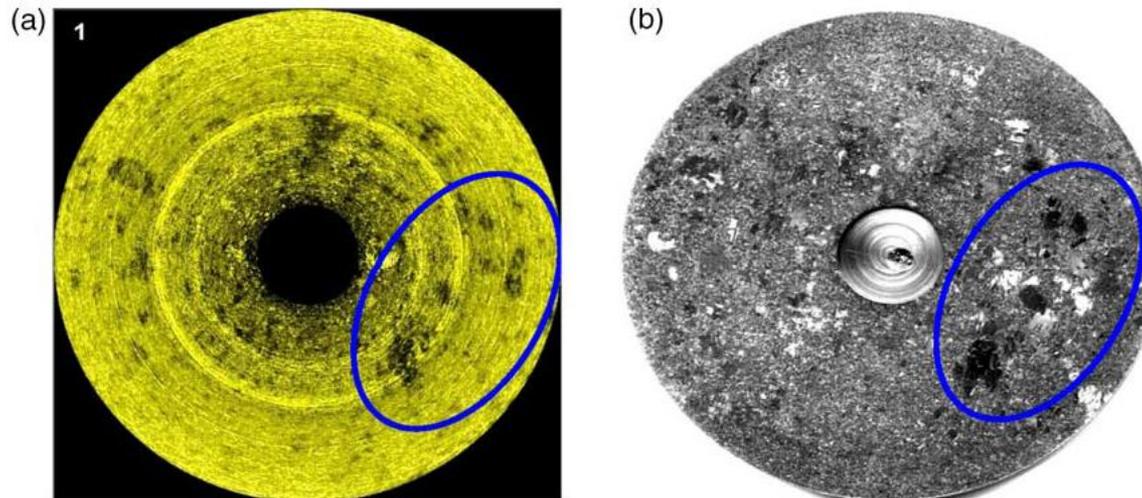
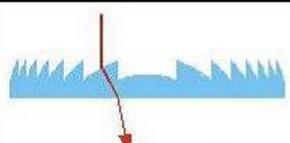
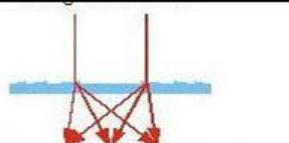
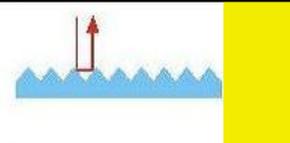
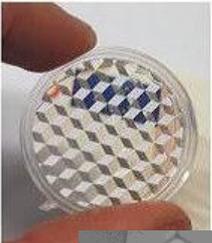
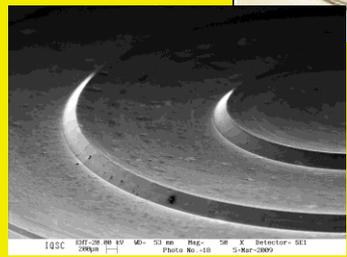
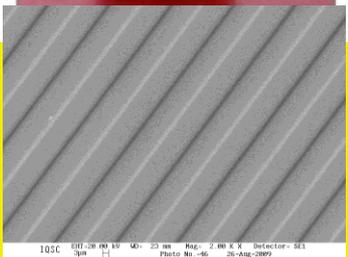
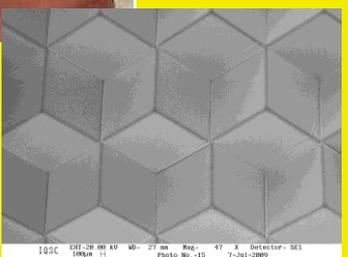


Fig. 17. (a) AE RMS polar map for polycrystalline OFHC copper workpiece. (b) Micrograph of chemically etched workpiece.

D.E. Lee, I. Hwang, C.M.O. Valente, J.F.G. Oliveira, D.A. Dornfeld. Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission. *Int. J. of Machine Tools & Manufacture* 46 (2006) 176–188

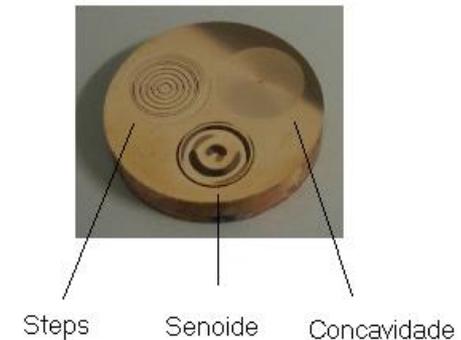
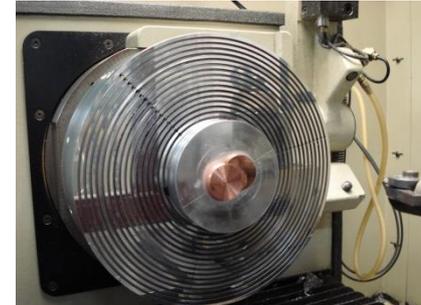
<p><b>Óptica Refrativa</b> Lentes de Fresnel Arranjos de lentes Lentes cilíndricas</p>	<p><b>Óptica Difrativa</b> Redes de difração Micropismas</p>	<p><b>Óptica reflectiva</b> Espelhos de Fresnel Arranjos de prismas Arranjos de lentes</p>
  		
  		
  		
<p>Fresnel com Reflexão interna Total</p>	<p>Molde de injeção de lentes intra-oculares</p>	<p>Ótica refletiva com arranjo de prismas cúbicos</p>

Fonte: RIEMER, O. (2008). A Review on Machining of Micro-Structured Optical Molds. Key Engineering Materials, v. 364-366, p. 13-18.

1. Torneamento sobre o eixo: Esférico, Anesférico, Fresnels, Estrutura difrativas

Arranjo de micro lentes possível através de:

- Ajustar a peça ao centro do eixo da máquina
- Montagem das estruturas de lentes e uma única moldura (inserto de molde)

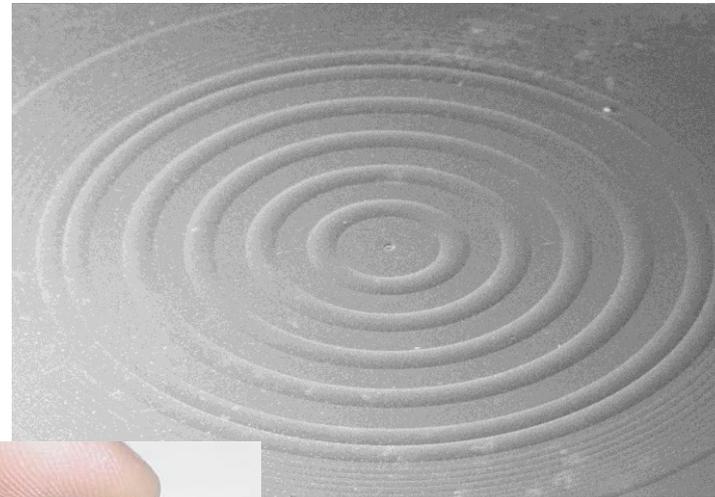




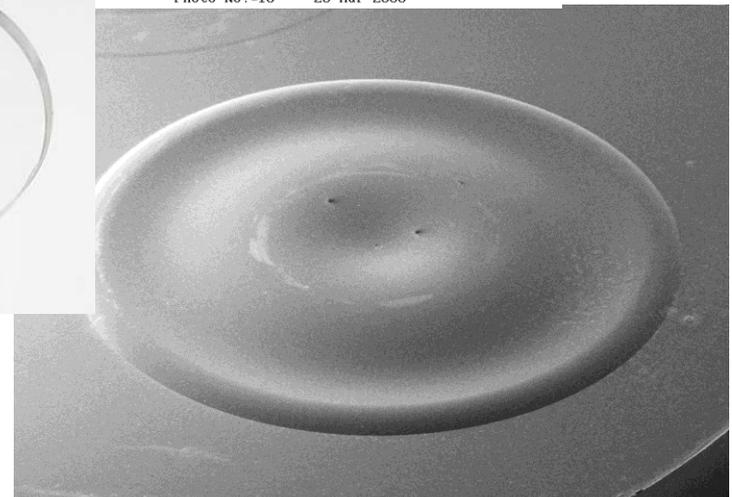
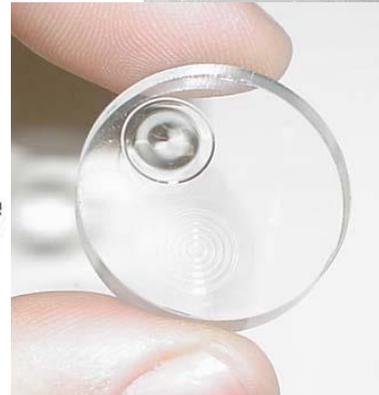
Steps

Senoide

Concavidade



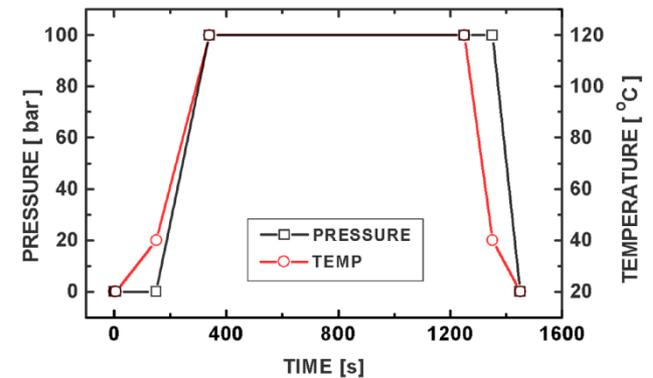
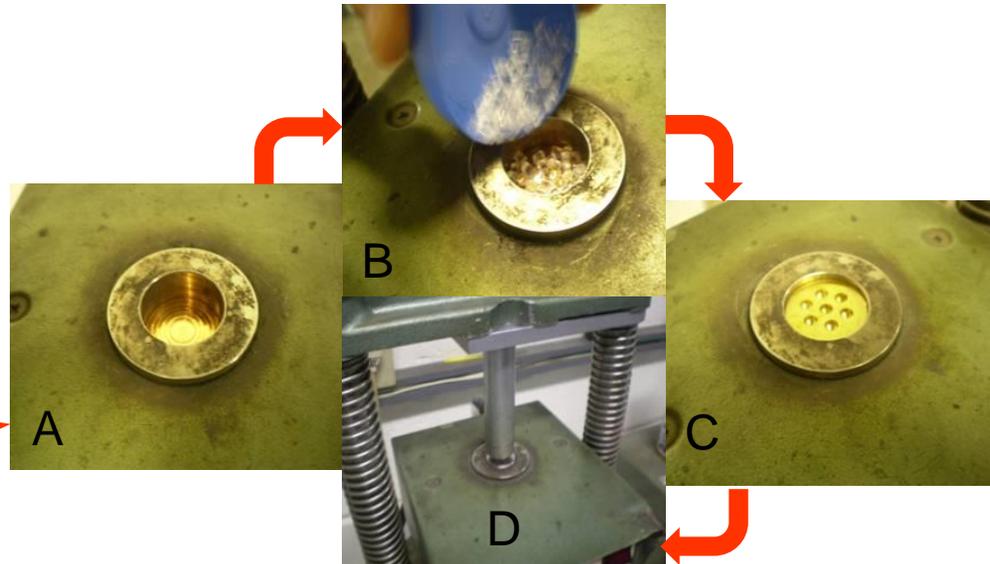
WD= 42 nm Mag= 43 X Detector= SE1  
Photo No. =18 25-Mar-2008



IQSC EHT=20.00 kV WD= 34 nm Mag= 34 X Detector= SE1  
200µm Photo No. =17 25-Mar-2008

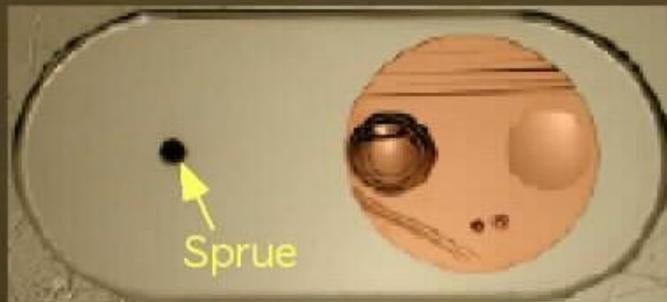
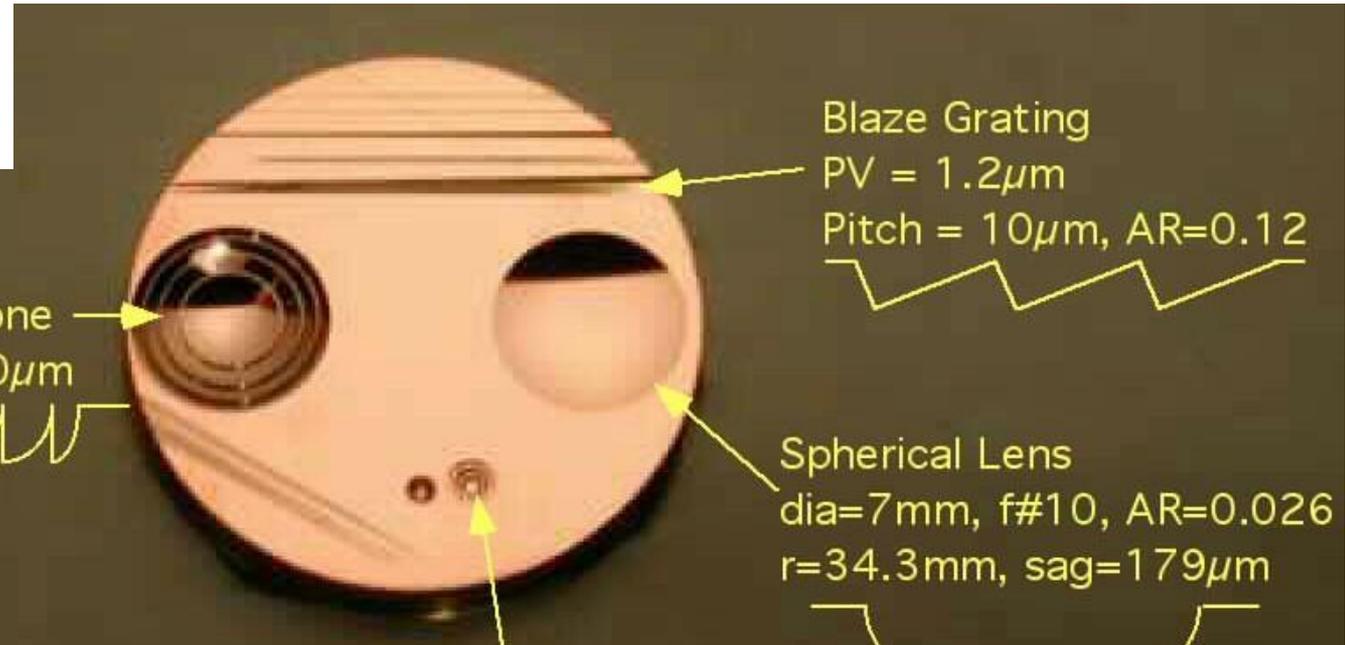
OLIVEIRA, R. A. (2006). Avaliação da replicagem de moldes torneados com ferramenta de diamante usando prensagem a quente em polimetilmetacrilato (PMMA). 133p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

# Processo de Replicação



Sequência de carregamento da empuñadora para prensagem a quente.

## Aplicações - Óptica Transmissão Micro-óptica



Insert Shown in Mold Cavity

**Wedding Cake**  
 dia. = 1.5, 1.0, 0.5mm  
 step height =  $200\mu\text{m}$   
 AR=0.13, 0.2, 0.4



Fonte: GILL, D. D. (2002). Precision Replication of co-molded meso and micro optics through injection molding. Ph.D. Thesis. North Carolina State University. Raleigh. 2002.

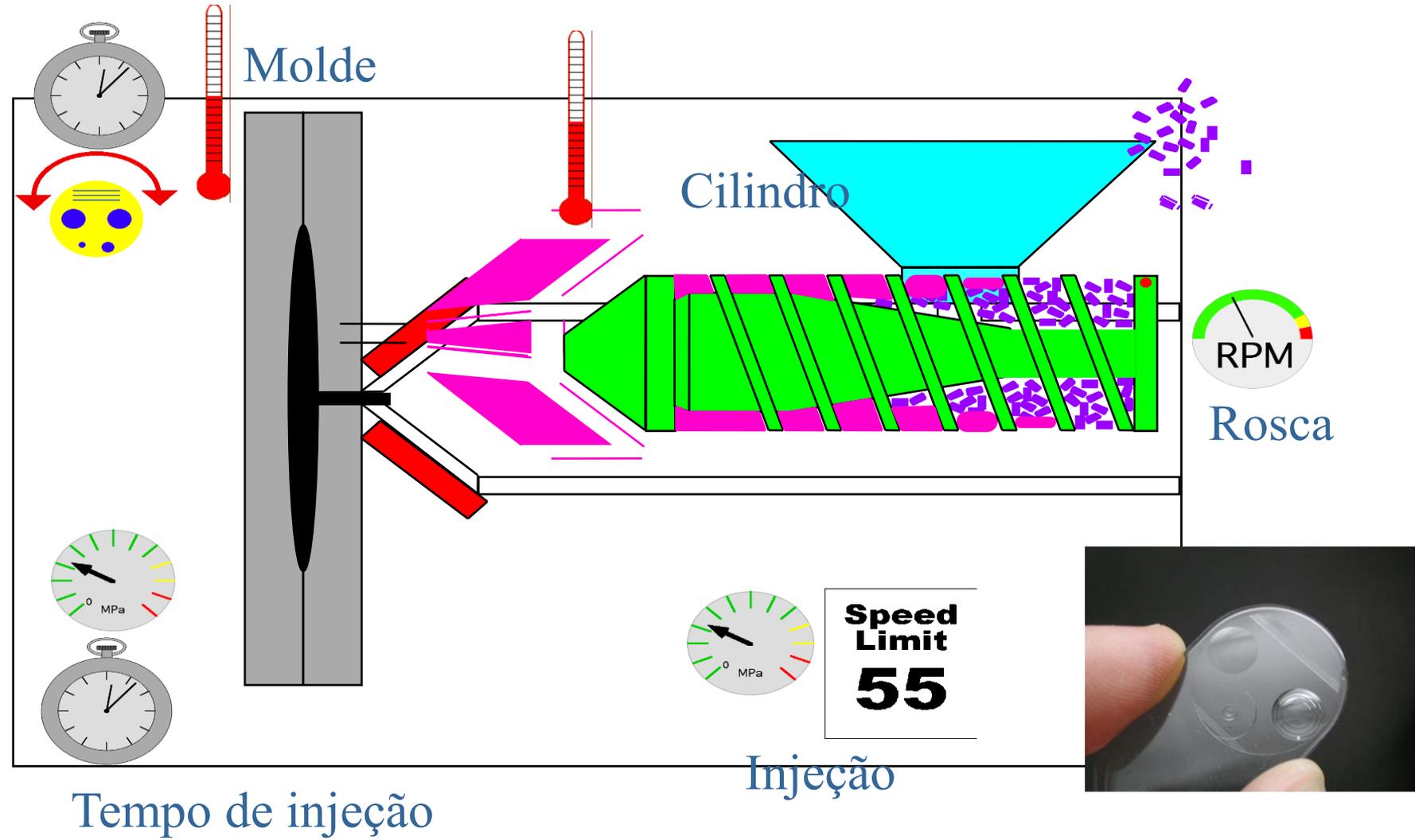
## Injetora Nissei HM7



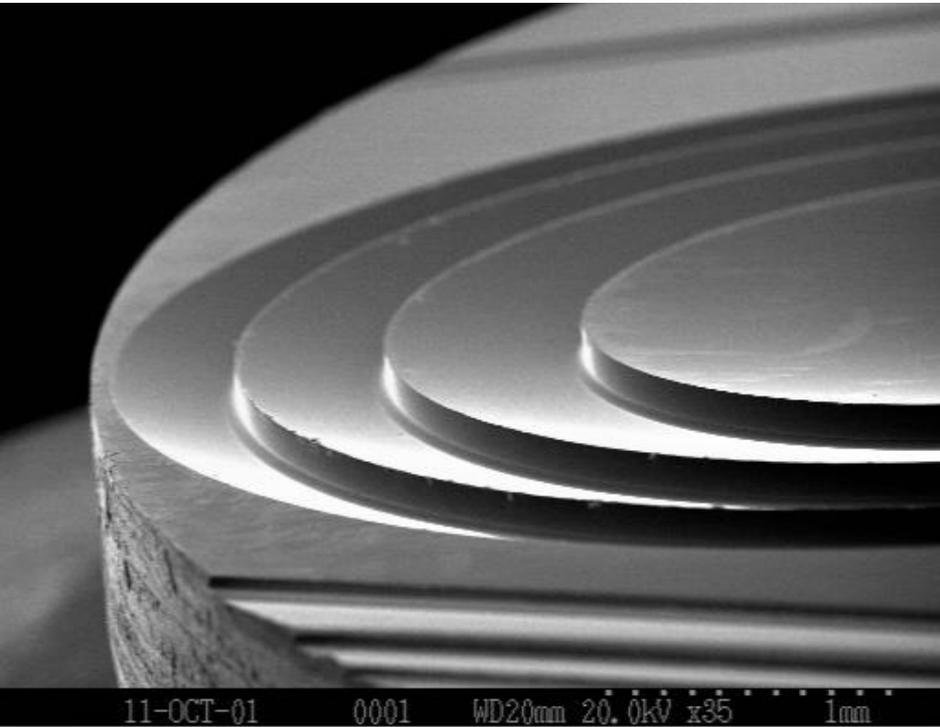
### Characteristics da Máquina

6.2 cm<sup>3</sup> Shot Size

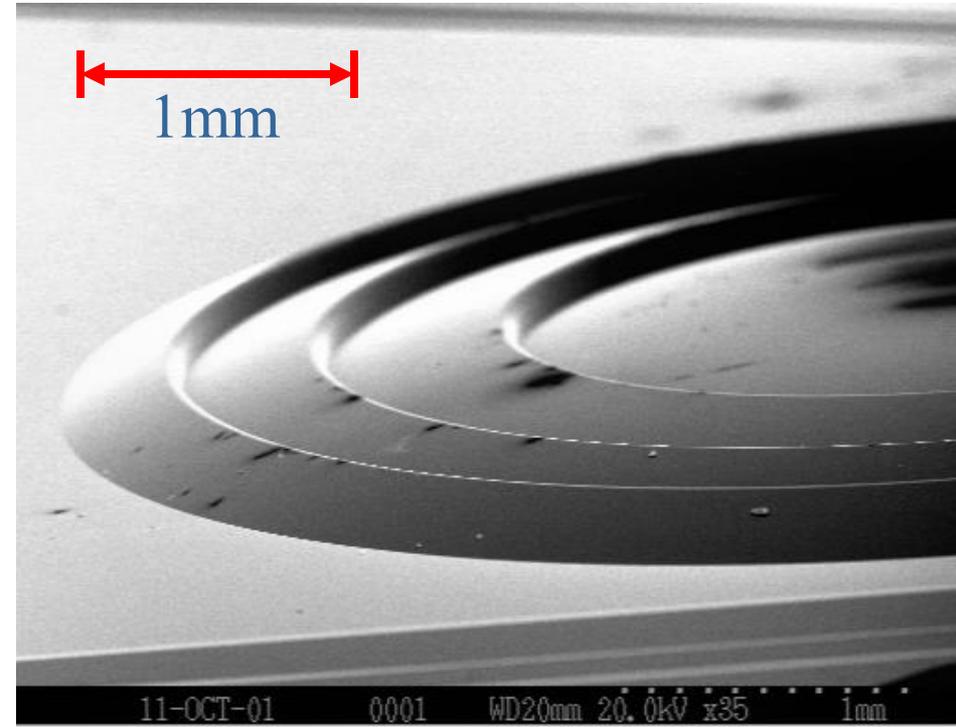
- 102 mm espaçamento entre as barras
- 7 Ton força de fechamento
- Acionamento Hidráulico
- Molde com refrigeração interna



## Aplicações - Óptica Transmissão -Micro-óptica



Molde



Lentes PMMA

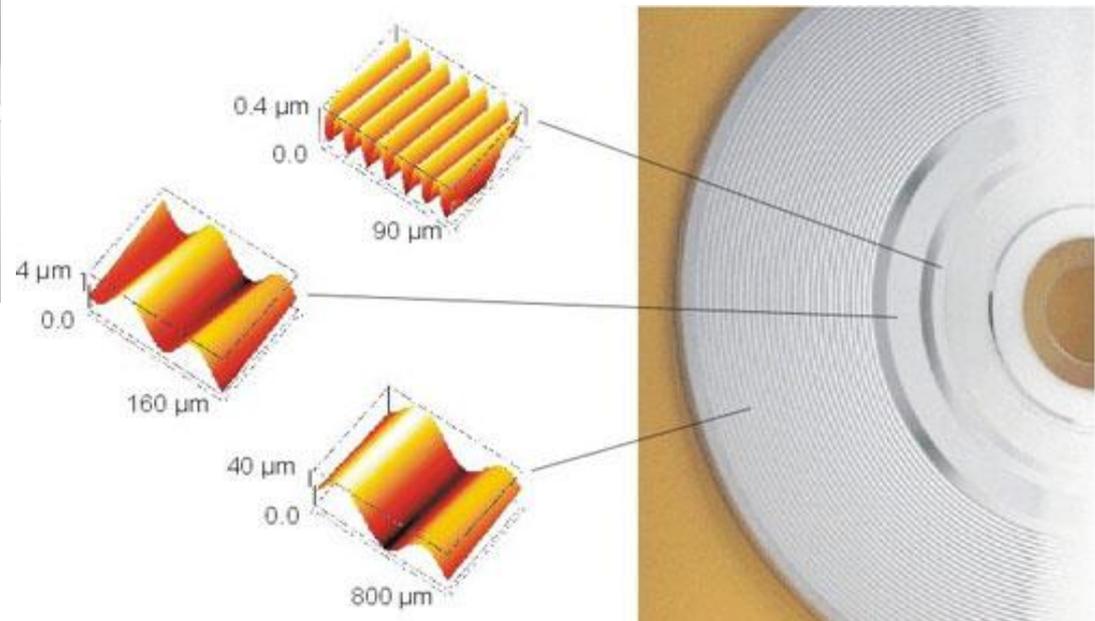
Fonte: GILL, D. D. (2002). Precision Replication of co-molded meso and micro optics through injection molding. Ph.D. Thesis. North Carolina State University. Raleigh. 2002.

## Aplicações - Óptica Transmissão Micro-óptica



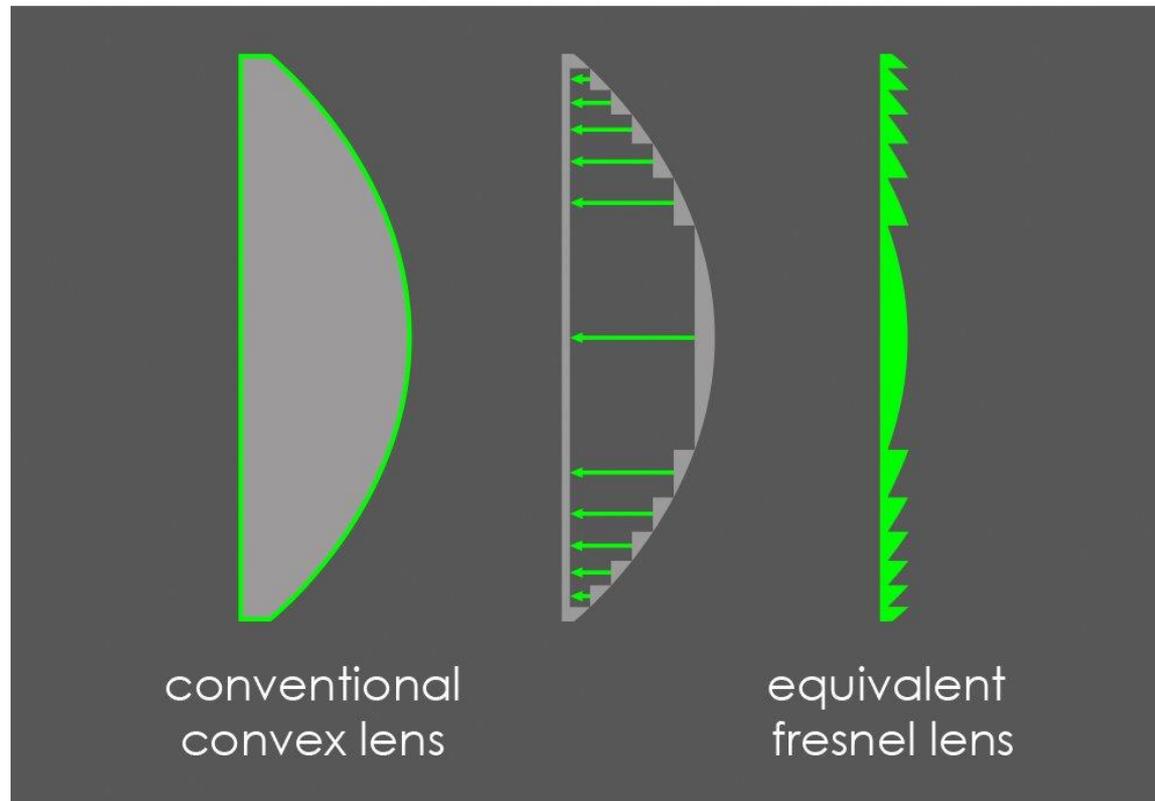
Lentes PMMA

Matriz de microestruturas senoidais em  
forma de CD

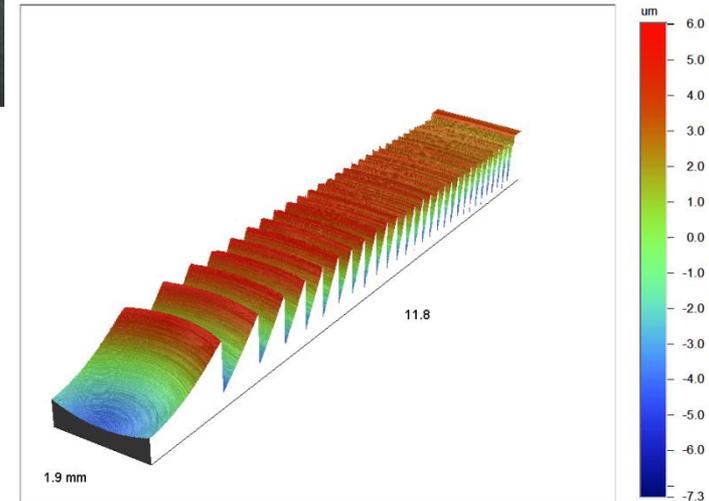
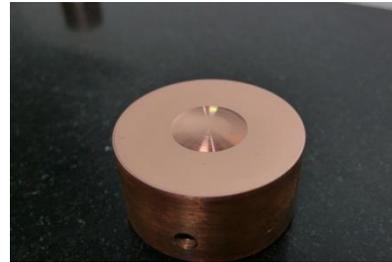
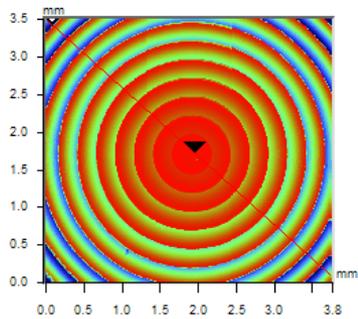


Fonte: RIEMER, O. (2008). A Review on Machining of Micro-Structured Optical Molds. Key Engineering Materials, v. 364-366, p. 13-18.

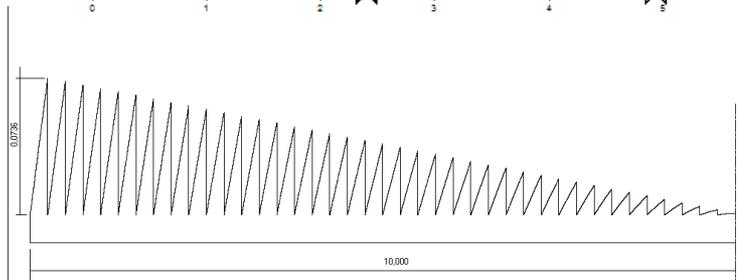
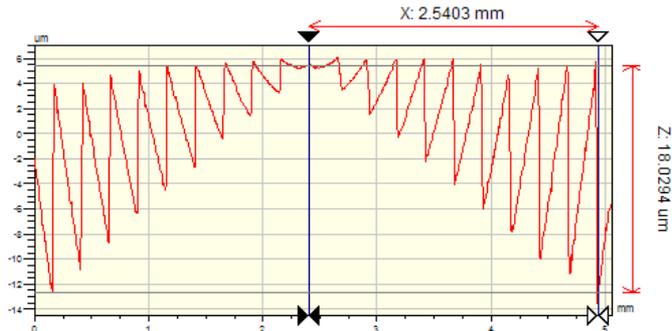
## Principle of a Fresnel Lens



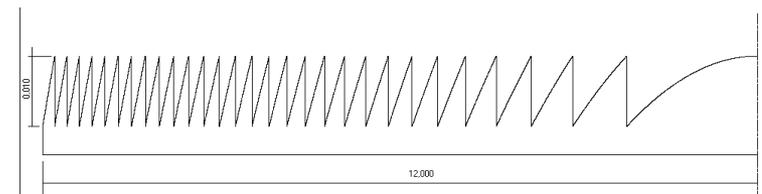
A conventional lens contains material that can be removed without affecting the lens properties.



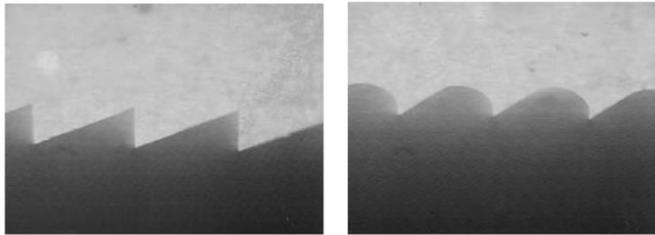
2 Point Profile



N° de Zonas	Foco	Área sup. [mm²]	Volum. [mm³]	Material	Altura Variável	Lente Fresnel Anisérica
40	70	321,035	7,801	1,49		Desenhado por LF2010



N° de Zonas	Foco	Área sup. [mm²]	Volum. [mm³]	Índice de refração do Material	Altura Constante	Lente Fresnel Anisérica
30	480	452,694	2,310	1,49		Desenhado por LF2010



(a)

(b)

Figura 2.14 – Seção de uma lente de Fresnel. (a) Moldagem por compressão. (b) Moldagem por injeção.



(a)



(b)

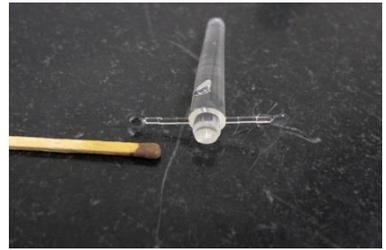
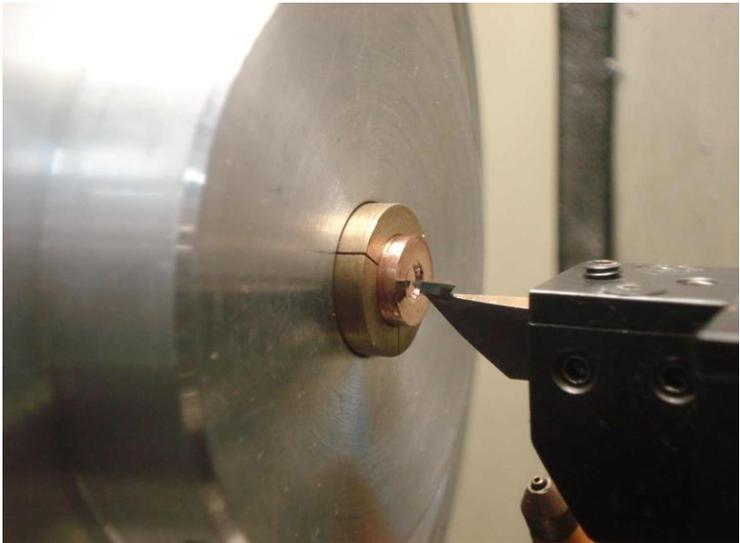
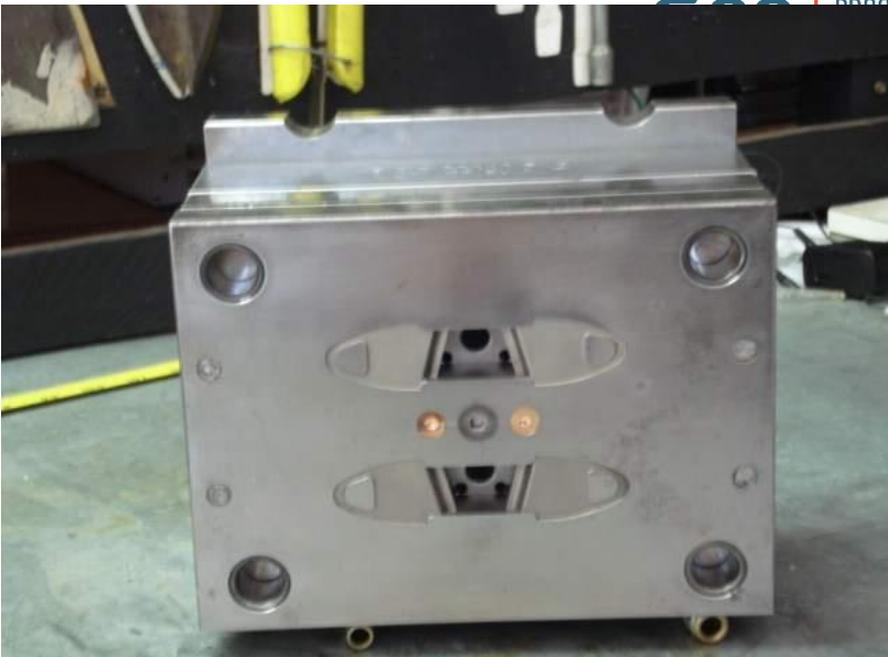


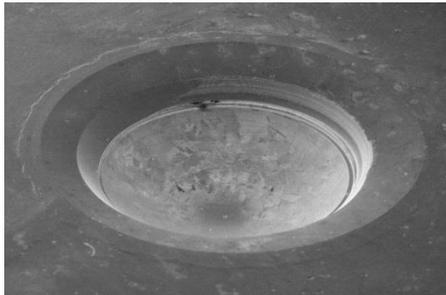
(c)



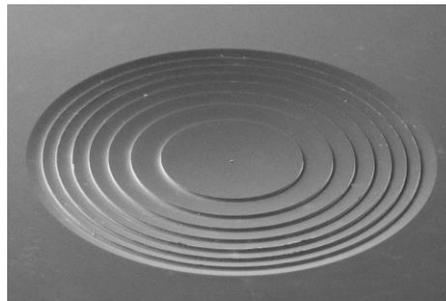
(d)

Figura 3.1 – (a) Lente anesférica. (b). Lente de Fresnel (c) Grade de difração. (d) Circular.

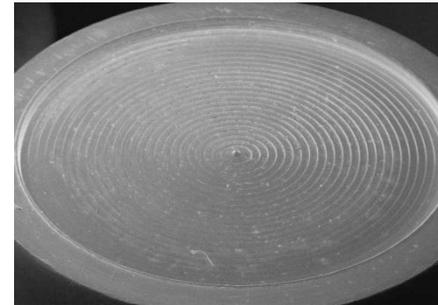




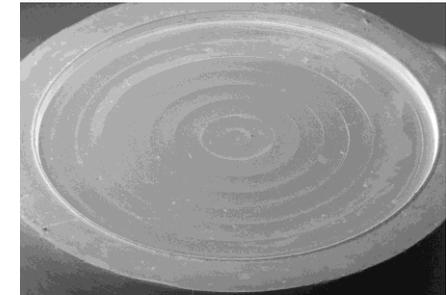
IQSC EHT-20.00 kV WD= 34 mm Mag= 60 X Detector= SE1  
100µm Photo No. -16 1-Jul-2010



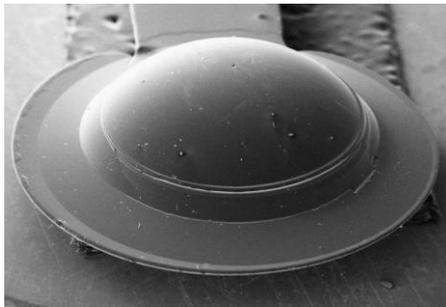
IQSC EHT-20.00 kV WD= 19 mm Mag= 100 X Detector= SE1



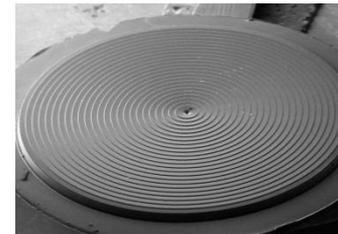
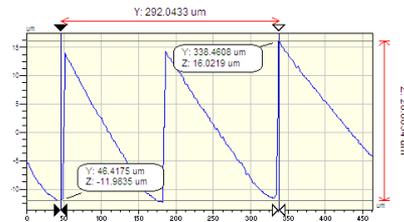
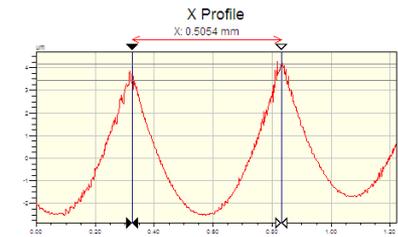
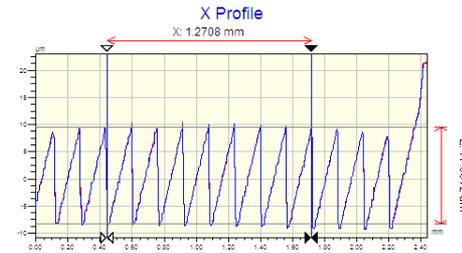
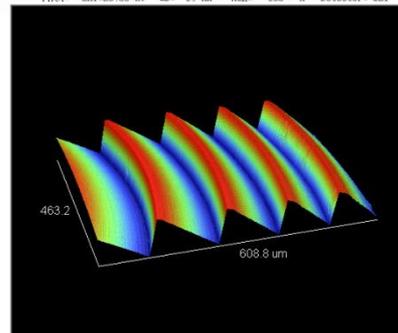
IQSC EHT-20.00 kV WD= 40 mm Mag= 41 X Detector= SE1  
100µm Photo No. -1 9-Sep-2010



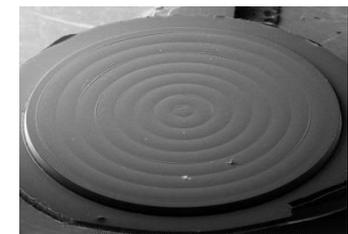
IQSC EHT-20.00 kV WD= 36 mm Mag= 41 X Detector= SE1  
200µm Photo No. -4 9-Sep-2010



IQSC EHT-20.00 kV WD= 14 mm Mag= 65 X Detector= SE1  
100µm Photo No. -45 1-Jul-2010

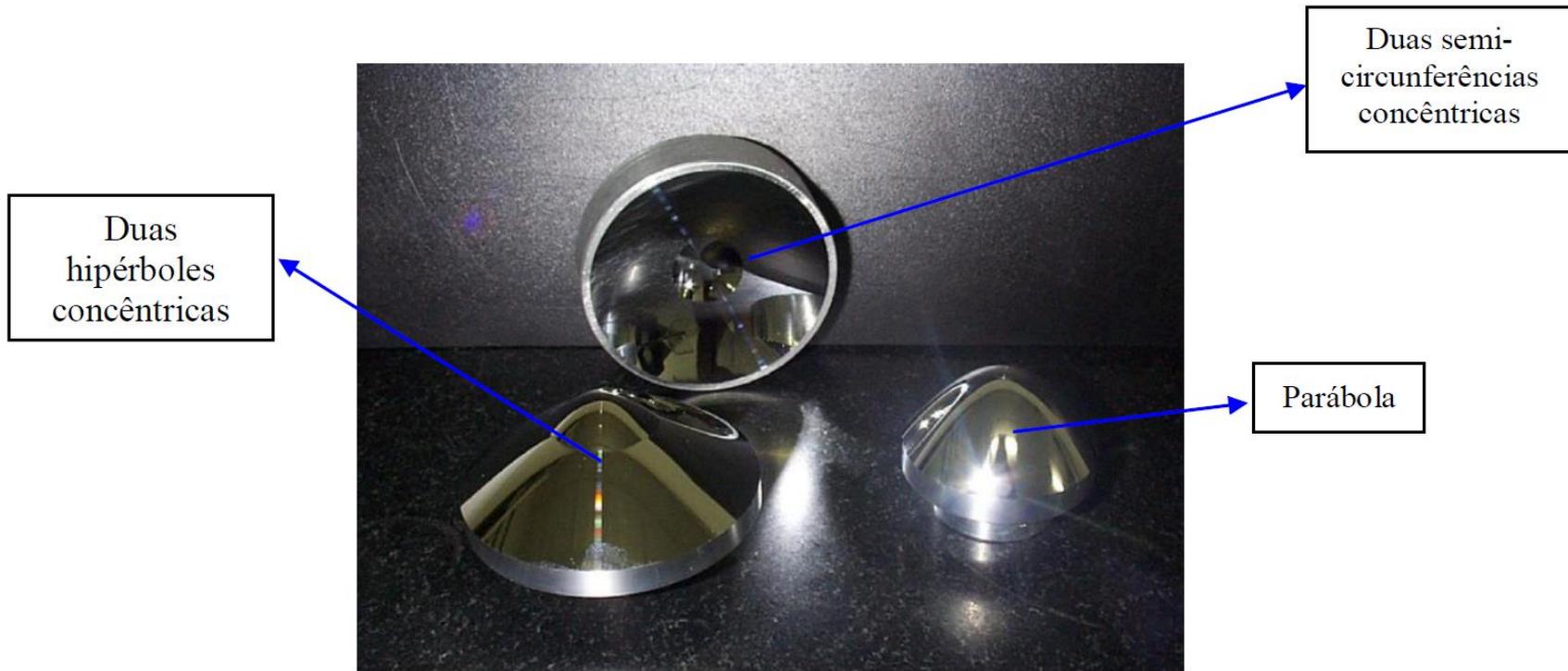


IQSC EHT-20.00 kV WD= 27 mm Mag= 42 X Detector= SE1  
100µm Photo No. -88 28-Aug-2010



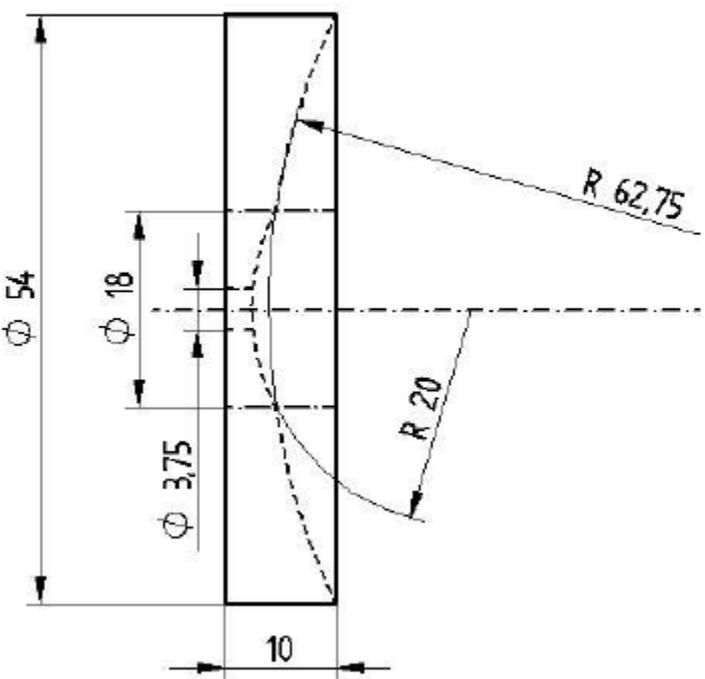
IQSC EHT-20.00 kV WD= 30 mm Mag= 41 X Detector= SE1  
200µm Photo No. -27 28-Aug-2010

## Aplicações - Óptica Reflexão



**Figura 4.4** – Peças de perfis não retilíneos, côncava, hiperbólica e parabólica

## Aplicações - Óptica Reflexão Seqüências de Fabricação

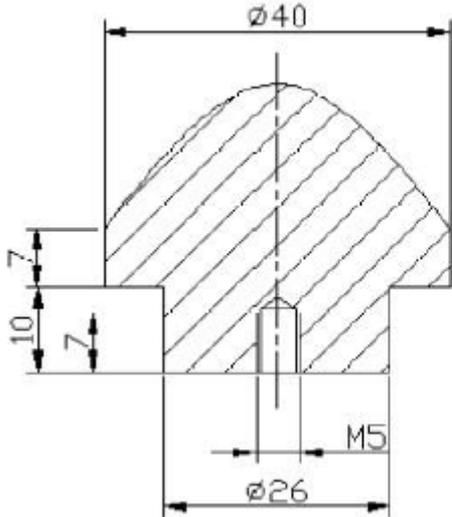
Processo de usinagem da peça de duas semi-circunferências concêntricas	
	<p>1 - Desenha-se a peça a ser usinada;</p> <p>2 - Corta-se o tarugo de alumínio baseando-se nas medidas do desenho;</p> <p>3 - O Blank é levado ao torno CNC da DENFORD para o início da pré-usinagem.</p>

## Aplicações - Óptica Reflexão Seqüências de Fabricação

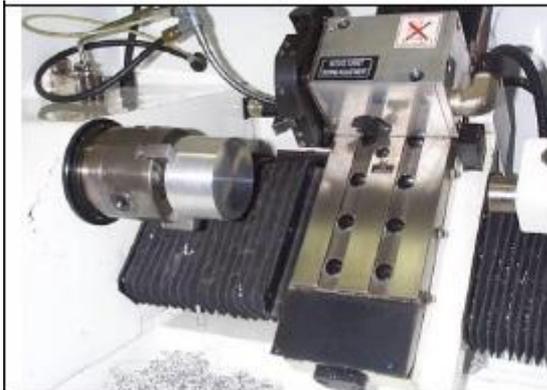
	<p>1 - O Blank é fixado a placa do torno;</p> <p>2 - Gera-se um programa CNC para efetuar a pré-usinagem, neste caso, o programa gerado fará interpolação circular.</p>		<p>1 - A peça já pré-usinada é fixado ao suporte e este a placa do tomo de ultraprecisão;</p> <p>2 - Gera-se um programa CNC para efetuar a usinagem, este, neste caso, fará interpolação circular.</p>
	<p>1 - Efetua-se a pré-usinagem utilizando uma ferramenta de metal duro.</p>		<p>1 - Peça já usinada, e já inspecionada.</p>
		<p>1 - As peças já usinada e inspecionadas são armazenadas;</p> <p>2 - Esta armazenagem confere as peças, proteção de poeira, umidade que venham a danificar sua superfície e etc.</p>	

TABELA 4. 1 - Seqüência do processo utilizado na usinagem da peça de duas semi-circunferências concêntricas

## Aplicações - Óptica Reflexão Seqüências de Fabricação

Processo de usinagem da peça de forma de parábola	
	<p>1 - Desenha-se a peça a ser usinada com as medidas requeridas;</p> <p>2 - A partir do desenho, corta-se o tarugo de alumínio para a obtenção do Blank;</p> <p>3 - O Blank já cortado é levado ao torno CNC da DENFORD para iniciação da pré-usinagem.</p>

## Aplicações - Óptica Reflexão Seqüências de Fabricação



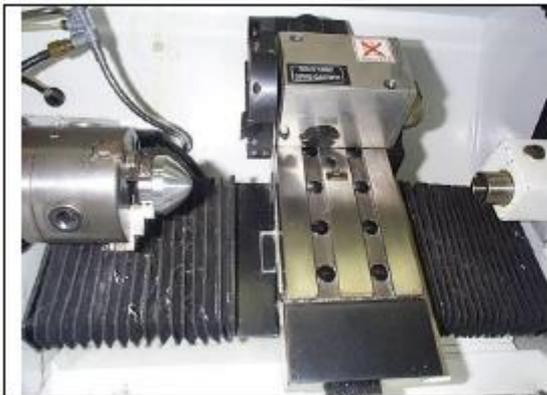
1 - O Blank é fixado a placa do torno;

2 - Gera-se um programa CNC para efetuar a pré-usinagem, neste caso, o programa gerado fará interpolação linear, mas descreverá um perfil parabólico.



1 - A peça já pré-usinada é fixada ao suporte e este a placa do torno de ultraprecisão;

2 - Gera-se um programa CNC para efetuar a usinagem, este fará interpolação linear, mas descreverá um perfil parabólico. No programa haverá a compensação do raio da ferramenta.

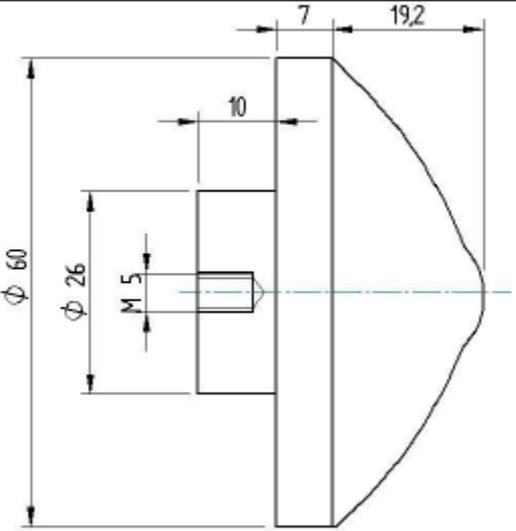


1 - Inicia-se a pré-usinagem, a ferramenta utilizada para tal processo no CNC da DENFORD é de metal duro;



1 - Peça já usinada e já inspecionada.

## Aplicações - Óptica Reflexão Seqüências de Fabricação

Processo de usinagem da peça de bi-hiperbólica	
	<ol style="list-style-type: none"><li>1 - Desenha-se a peça a ser usinada com as medidas requeridas;</li><li>2 - A partir do desenho, corta-se o tarugo de alumínio para a obtenção do Blank;</li><li>3 - O Blank já cortado é levado ao torno CNC da DENFORD para iniciação da pré-usinagem.</li></ol>

## Aplicações - Óptica Reflexão Seqüências de Fabricação

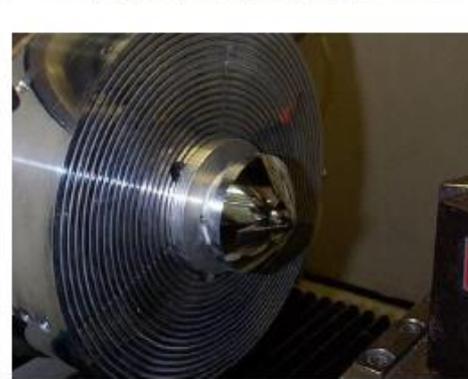


1 - O Blank é fixado a placa do tomo;

2 - Gera-se um programa CNC para efetuar a pré-usinagem, neste caso, o programa gerado fará interpolação linear, mas descreverá um perfil hiperbólico.

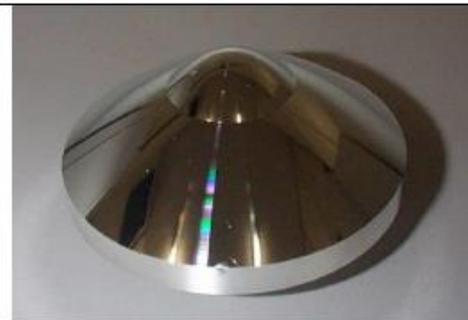


1 - A ferramenta utilizada para a pré-usinagem no CNC da DENFORD é de metal duro;

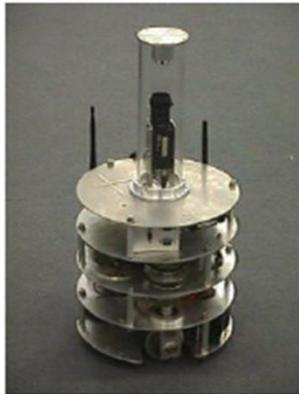


1 - A peça já pré-usinada é fixada ao suporte e este a placa do torno de ultraprecisão;

2 - Gera-se um programa CNC para efetuar a usinagem. Este fará interpolação linear, mas descreverá um perfil hiperbólico. No programa haverá a compensação do raio da ferramenta.



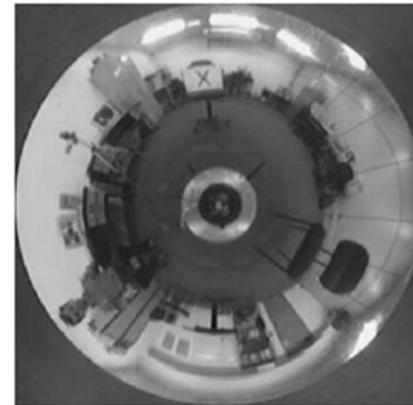
1 - Peça já usinada, e já inspecionada.



a)



b)



c)



d)

