

MICROUSINAGEM: AULA 4

MÁQUINAS-FERRAMENTAS PARA MICROCORTE

Prof. Assoc. Renato Goulart Jaszewicz

Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues

INTRODUÇÃO

Miniaturização: microfluídica, micromecânica, microeletrônica e micro-óptica

Microusinagem Mecânica: fresamento, torneamento e retificação

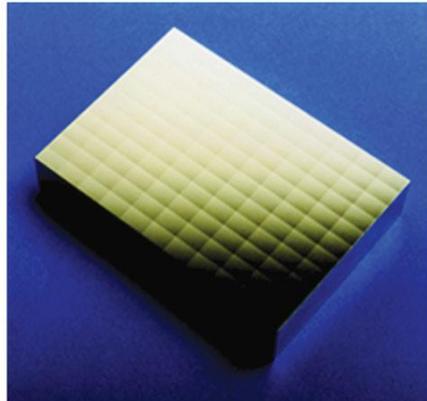
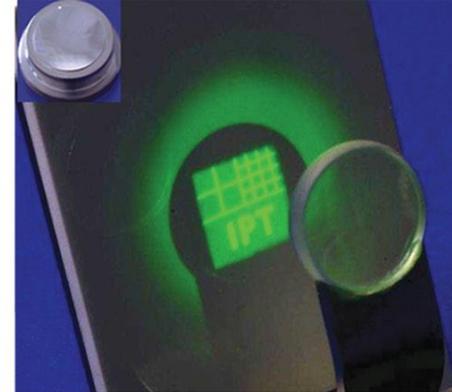
Máquinas: precisão < 100 nm e rugosidades em ângstron

Requerimentos: automação das máquinas (quantidade, complexidade, aplicação das peças)

Micro-óptica e micromoldes: troca manual da ferramenta, alinhamento da peça e referenciamento visual é ainda comum.

Superfícies ópticas complexas: rotinas CNC não padronizadas e geradas via CAM

INTRODUÇÃO



Componentes de precisão e ultraprecisão

COMPONENTES DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS DE ALTA PRECISÃO

1. Estrutura da base da máquina: granito ou fundidos minerais

- Baixas forças de corte (< 100 N) e elevadas qualidade superficial da peça e precisão nos erros de forma;
- Termicamente estável (baixo coeficiente de expansão térmica e baixo calor específico).

Granito: mesas de máquinas de ultraprecisão

- Coeficiente de expansão térmica: $6,5 \mu\text{m/mK}$ - 2,5x menor que o dos fundidos minerais
- Densidade: $2,8 \text{ kg/dm}^3$ – propriedades dinâmicas (frequência natural)

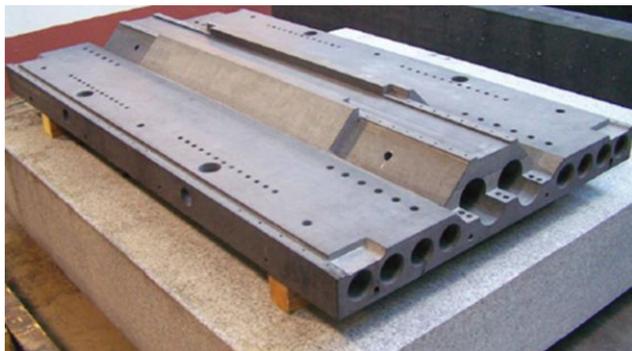
Guias hidrostáticas: melhoram o amortecimento (óleo na superfície x saturação = perda de precisão muito pequena)

Guias usinadas na própria base: serramento, fresamento, retificação e lapidação (retilineidade $< 1 \mu\text{m/m}$)

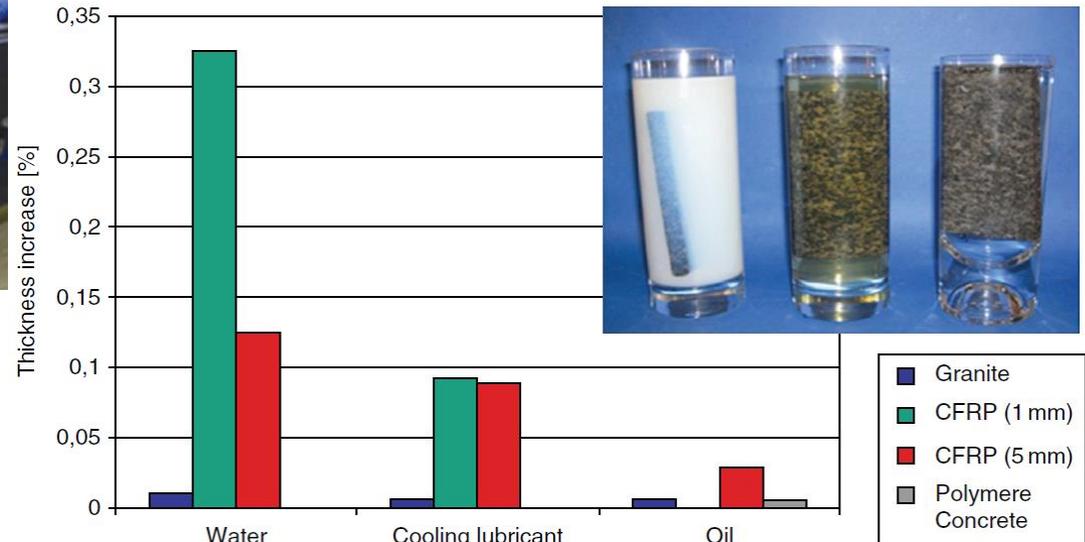
COMPONENTES DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS DE ALTA PRECISÃO



Base de granito para máquina de precisão



Sensibilidade a exposição de líquidos



COMPONENTES DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS DE ALTA PRECISÃO

Base de fundido mineral: produção em maior quantidade do que granito

Moldagem (molde): resina epóxi + minerais (repetibilidade)

Moldagem: passagem de cabos ou sistemas de resfriamento (tubos ou barras de aço)

Aplicação de revestimento: camadas finas para precisão $< 10 \mu\text{m/m}$

Anti stick-slip, atrito 1/7 do par aço-FoFo

Peças móveis: FoFo, aço e alumínio (rigidizes, peso e propriedades térmicas específicas)

- Razão Módulo de Elasticidade/Densidade similares entre si
- Geometria: fresamento, torneamento, retificação e lapidação

Simetria em máquinas para microcorte: compensações térmicas e mecânicas (excitação dinâmica)

COMPONENTES DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS DE ALTA PRECISÃO

Propriedades dos materiais para elementos estruturais de máquinas-ferramentas de precisão

Characteristic	Unit	Steel	Grey Cast Iron	Granite	Mineral Cast	Carbon Fiber Reinforced Plastics
Compression Strength	N/mm ²	250–1200	600–1000	70–300	140–170	n.A.
Tensile Strength	N/mm ²	400–1600	150–400	30–35	25–40	400–2400
Modulus of Elasticity	kN/mm ²	210	80–120	35–90	30–40	48–360
Heat Conductivity	W/mK	50	50	1,7–2,4	1,3–2,0	1–50
Coefficient of thermal expansion	µm/mK	12	10	6,5–8,5	12–20	(–1)–0
Density	g/cm ³	7,85	7,15	2,9–3,0	2,1–2,4	1,6
Damping (logarithmic decrement)	–	0,002	0,003	0,015	0,02–0,03	n.A.

COMPONENTES DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS DE ALTA PRECISÃO

2. Sistemas de acionamento: depende do processo de fabricação e da trajetória da ferramenta

Características opostas: atrito x precisão de posicionamento

Motor linear: *default*

- Rigidez teórica infinita e força menor
- Dinâmica elevada (acelerações e Fator K_v)

Fator de amplificação da velocidade de controle da posição: $K_v = \frac{v}{\delta}$

v: velocidade na trajetória de usinagem e δ : erro de posicionamento

Eixo de transmissão Mecânica: 3,5 (m/min)/m

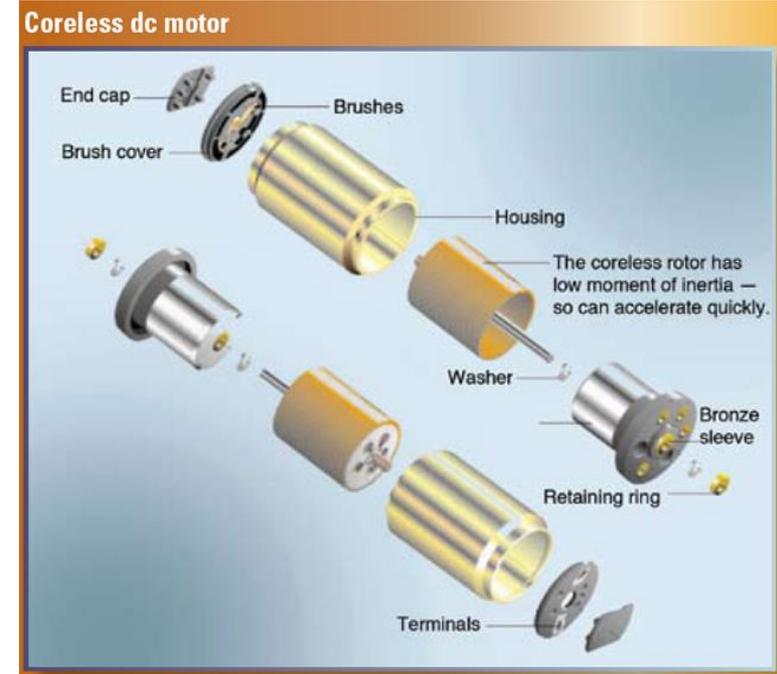
Motor linear: 25 (m/min)/m



COMPONENTES DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS DE ALTA PRECISÃO

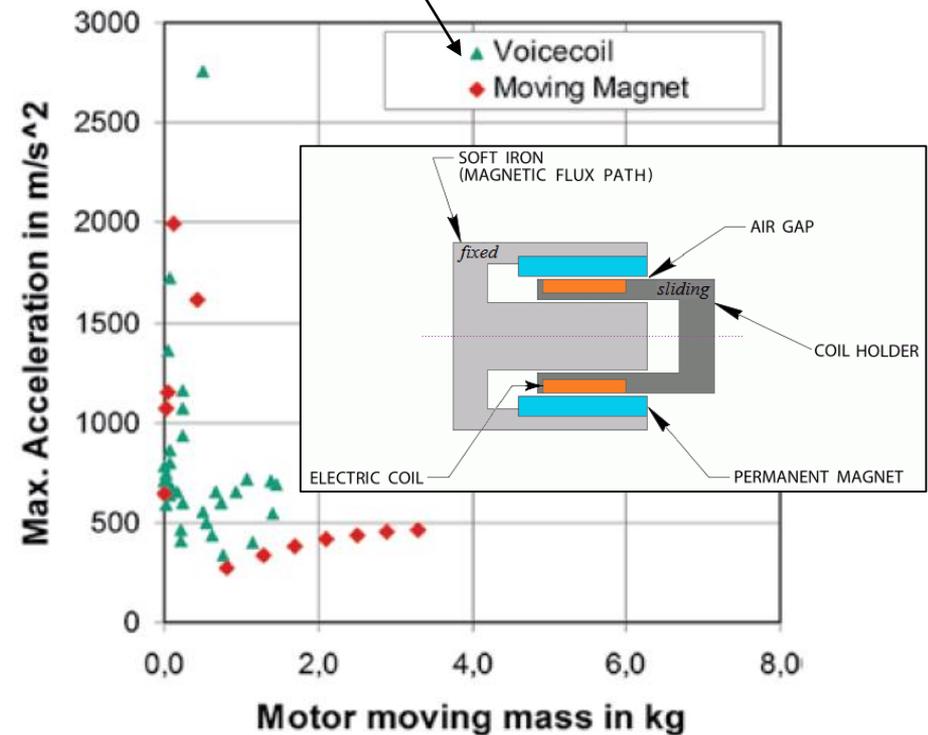
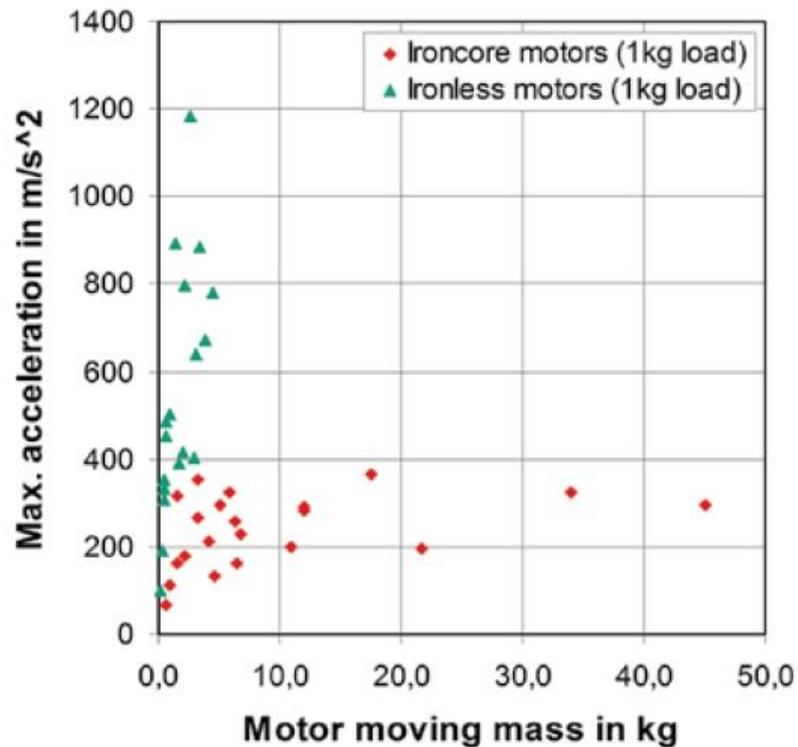
Motores lineares comerciais:

- Núcleo de material ferroso (um lado magnético + enrolamento)
 - Forças magnéticas altas inconstantes ($\gg \gg 1000 \text{ N}$)
 - Efeito *Cogging* limita o movimento contínuo (torneamento com diamante)
 - Projetos compactos e facilidade de resfriamento
- Núcleo de material não-ferroso (bobina entre dois lados magnéticos)
 - Alta precisão de posicionamento
 - Movimento contínuo
 - Motor sem núcleo + mancal areostático (passo de 10 nm)



COMPONENTES DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS DE ALTA PRECISÃO

Força linear, precisão e aquecimento



Comparação entre motor com núcleo em ferro e sem núcleo.

COMPONENTES DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS DE ALTA PRECISÃO

Microrretificadora: necessidade de elevados amortecimentos (fusos hidrostáticos)

- Movimento rotativo em linear
- Muito pouco desgaste, baixíssimo atrito e sem folga
- Rigidez e precisão constantes mesmo com alta velocidade e carga
- Elevada rigidez axial (efeito de compressão do fluido)
- Custo elevado, tamanho maior e carga térmica (viscosidade do fluido)



Microfresadora: fusos de esferas

- Alta precisão de posicionamento (100 nm)
- Não indicados para aplicações altamente dinâmicas
- Não indicados para máquinas de ultraprecisão



COMPONENTES DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS DE ALTA PRECISÃO

3. Sistemas de guia: depende do processo de fabricação e de requerimentos da peça

Máquinas-ferramentas convencionais: mancais de agulha ou de roletes

Micromáquinas: mancais de agulha não-recirculantes (linearidade de 1,5 $\mu\text{m}/300\text{ mm}$)

- Alta rigidez
- Tamanho compacto (minimiza Erro de Abbé)

Mancais de esferas: ruído e oscilações (não para superfícies ópticas)



COMPONENTES DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS DE ALTA PRECISÃO

Mancais fluídicos: aerostático ou hidrostático

Fino filme de fluido separa as partes estacionário e deslizante

- Mancais aerostáticos: 3 a 10 μm
- Mancais hidrostáticos: 7 a 20 μm

Pré-carregamento: magnético (aerostático) e vácuo (hidrostático)



Hidrostático



Aerostático

COMPONENTES DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS DE ALTA PRECISÃO

Ar como fluido: compressível

- Baixa carga e amortecimento
- Pode oscilar (mal alinhamento)
- Fresadoras e tornos de precisão: movimento sem atrito pode ser obtido com baixo impacto e em altas velocidades

Óleo como fluido: incompressível

- Elevada carga
- Força de atrito (viscosidade do fluido)
- Velocidades altas (impacto térmico)
- Elevado amortecimento (retificadoras de precisão e máquinas de ultra precisão)

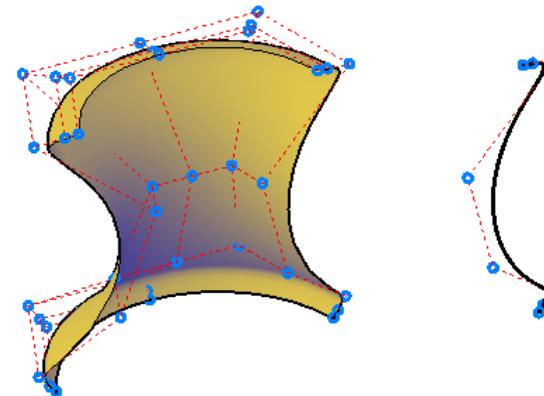
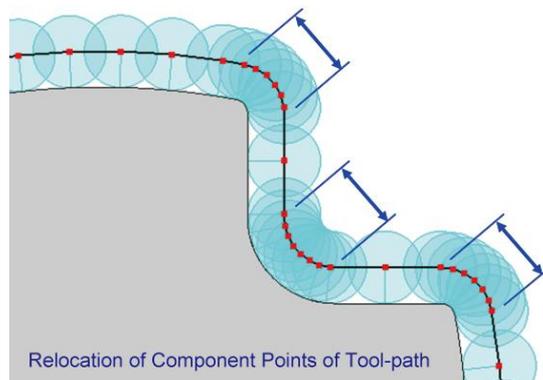
COMPONENTES DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS DE ALTA PRECISÃO

4. Sistemas de controle: interface amigável com o usuário da máquina, estabilidade em operação e precisão no controle do movimento

Programação CNC: Manual (peças simples) x CAM (peças complexas)

Algumas máquinas para microcorte: leem e executam trajetórias de ferramentas em polinômios (spline, nurbs)

Maioria: quebra polinômios em pontos para discretizar a trajetória, velocidade e aceleração da ferramenta



COMPONENTES DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS DE ALTA PRECISÃO

Número de pontos discreto x qualidade da micropeça x esforço computacional da máquina

Baixo número de pontos = qualidade ruim da peça e baixo esforço computacional

Alto número de pontos = melhor qualidade da peça e alto esforço computacional

- Separação dos G-códigos em partes
- Envio contínuo dos G-códigos

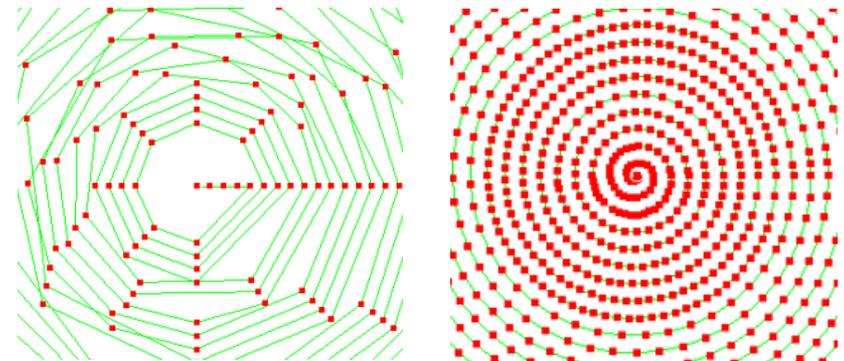


Perdas de dados
Dados alterados

Processamento online: alta taxa de transferência

- Controle do cálculo da trajetória da ferramenta
- Controle da velocidade e posição dos eixos
- Feedback

LOOPING DE CONTROLE



MÁQUINAS E COMPONENTES PARA TORNEAMENTO COM DIAMANTE

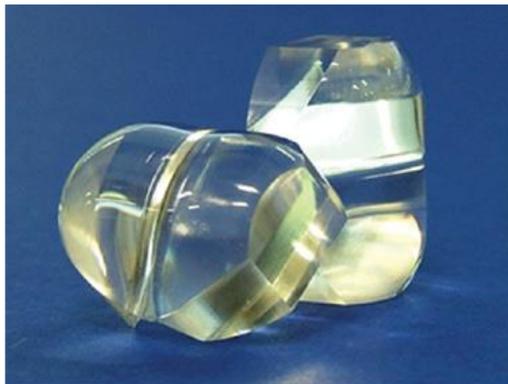
Máquinas: tornos de ultraprecisão

Material das peças: metais não-ferrosos, polímeros e materiais frágeis

Lotes: peças individuais a milhares de peças

Geometria das peças: rotacionais com formas livres

Pequenos lotes: produção de insertos (moldes) para injeção de lentes poliméricas (lentes de contato, sensores, LEDs).



Injection molded freeform lens

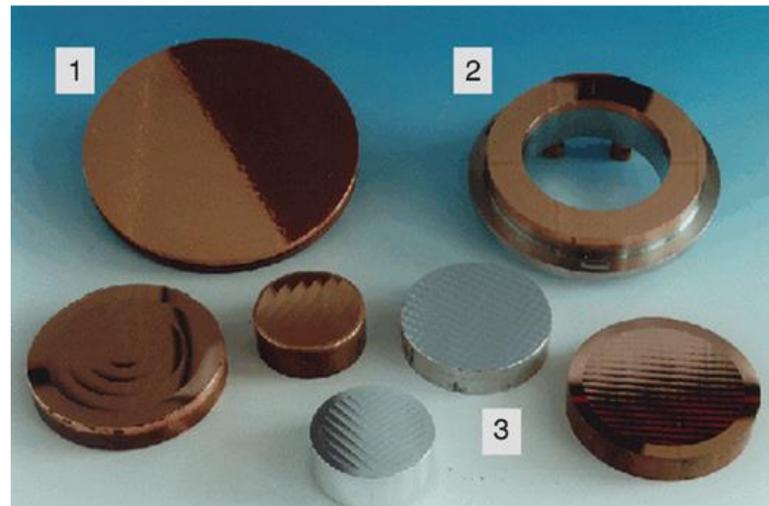


Mold insert for injection molding

MÁQUINAS E COMPONENTES PARA TORNEAMENTO COM DIAMANTE

Pequenos lotes: produção de espelhos em metais de acabamento especular.

- (1) Espelho para modulação de fase (redução do comprimento de onda de laser)
- (2) Espelho helicoidal para laser coaxial
- (3) Espelho facetado para formar e guiar feixe de laser (aumentar a eficiência)

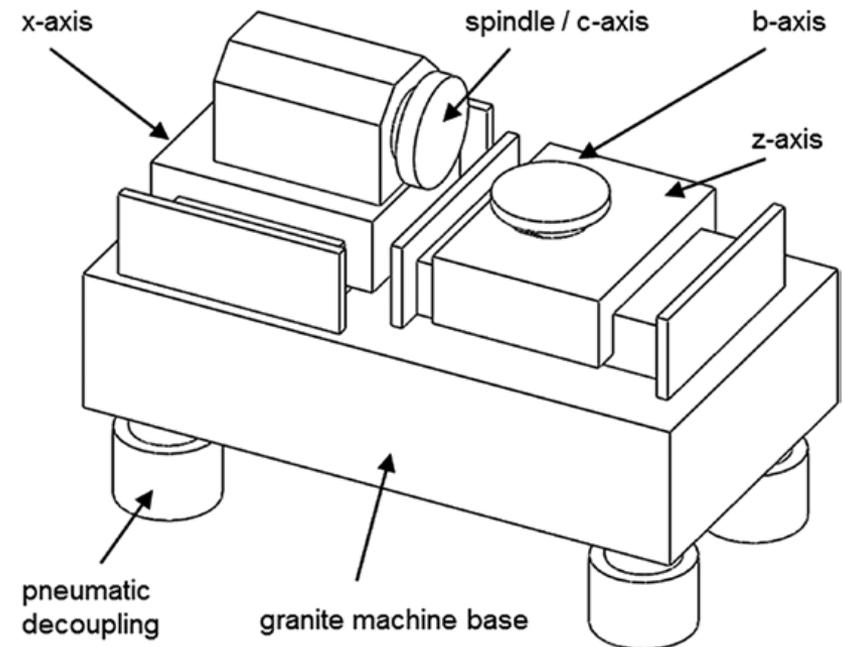


MÁQUINAS E COMPONENTES PARA TORNEAMENTO COM DIAMANTE

Setup típico: assegura melhor estabilidade, rigidez e precisão

Tornos de ultraprecisão:

- Retilneidade de $0,1 \mu\text{m}/100 \text{ mm}$ (mancais hidrostáticos)
- Movimento sem stick-slip
- Elevada rigidez e amortecimento: baixíssimas rugosidades superficiais e erros de forma
- Encoders ópticos: *feedback* com resoluções de 140 nm (normal) ou $0,035 \text{ nm}$ (quadratura)
- *Spindle*: mancais aerostáticos (redução do calor)



MÁQUINAS E COMPONENTES PARA TORNEAMENTO COM DIAMANTE

Mercado de tornos de ultraprecisão: menor se comparado ao de macrousinagem

	Precitech Nanoform 700	Moore 350FG	LT Ultra MTC 250	DAC ALM Lens Lathe
Axes	X: hydrostatic, 350 mm travel, 4 m/min Z: hydrostatic, 300 mm travel, 4 m/min B (optional): hydrostatic	X: hydrostatic, 350 mm travel, 4.5 m/min Z: hydrostatic, 300 mm travel, 4.5 m/min B (optional): hydrostatic	X: hydrostatic, 270 mm travel, 1.5 m/min Z: hydrostatic, 270 mm travel, 1.5 m/min B (optional): aero- or hydrostatic	X: aerostatic, 305 mm travel, 18 m/min Z: aerostatic, 203 mm travel, 18 m/min
Spindle	Air bearing, 7.000 RPM (3000 RPM as C-axis)	Air bearing, 10.000 RPM (3000 RPM as C-axis)	Air bearing, 4.500 RPM (2000 RPM as C-axis)	Air bearing, 10.00 RPM (2000 RPM as C-axis)
Load capacity spindle	85 kg @ 100 psi	70 kg @ 100 psi/85 kg @ 145 psi	30 kg	Not specified
Resolution	0.032 nm linear, 0.026 arc-sec C-Axis	0.034 nm linear, 0.07 arc-sec C-Axis	0.034 nm linear, 0.026 arc-sec C-Axis	Sub-nanometer, sub-degree
Specified form accuracy	< 0.125 μm (non specified workpiece)	< 0.15 μm (75 mm diameter, 250 mm convex sphere)	< 0.100 μm (100 mm diameter)	+/- 2.5 μm center thickness, +/- 5 μm diameter, +/- 2.5 μm radius of curvature
Specified surface roughness	< 1.0 nm Ra	< 3.0 nm Ra	< 2.0 nm Ra	< 2.0 nm Ra
Control System	UPx controller (QNX)	Delta Tau PC based	Delta Tau PC based	DAC Motion Control System

MÁQUINAS E COMPONENTES PARA TORNEAMENTO COM DIAMANTE



350 FG (Moore Nanotech)



Nanoform 700 Ultra (Ametek Precitech)



MTC 250 (LT Ultra)



ALM 2 Eixos (DAC International)



HSC Smart X (Schneider GmbH)



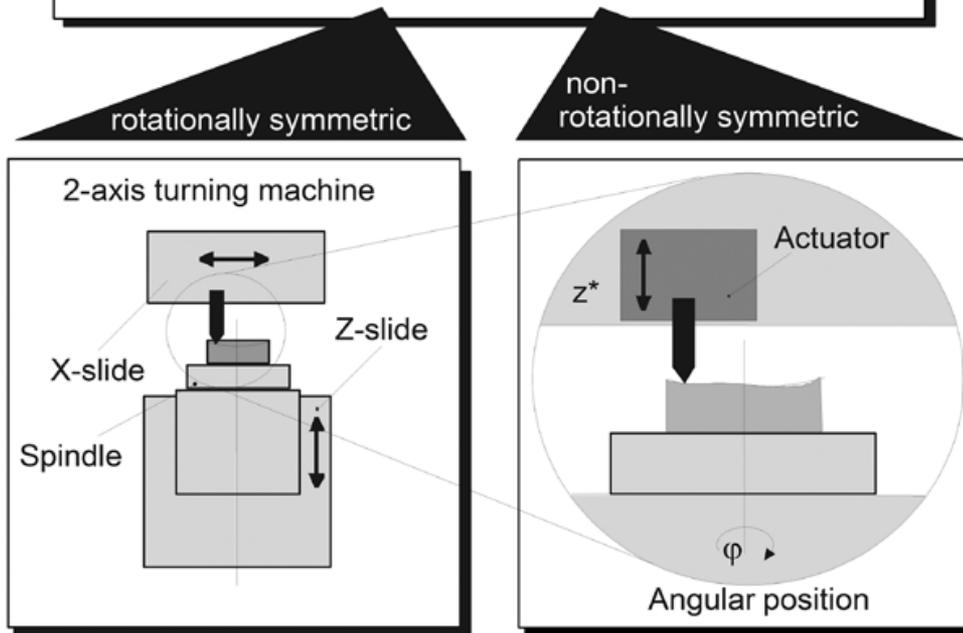
VFT-Orbit (Satisloh GmbH)

MÁQUINAS E COMPONENTES PARA TORNEAMENTO COM DIAMANTE

Tecnologia de Servo-Ferramenta Rápida

Surface description of non-rotationally symmetric surfaces

$$z = f(r, j) = \boxed{f(r)_{rs}} + \boxed{f(r, j)_{nrs}}$$



MÁQUINAS E COMPONENTES PARA TORNEAMENTO COM DIAMANTE

Tecnologia de Servo-Ferramenta Rápida

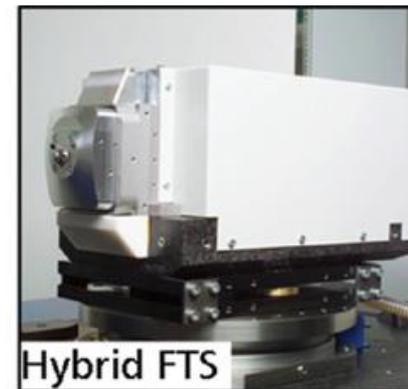
Sistemas de servo-ferramenta rápida



Deslocamentos: 35 μm
Frequência: 1500 Hz



Deslocamentos: 10 mm
Frequência: 600 Hz



Deslocamentos: 25 mm
Frequência: 1500 Hz

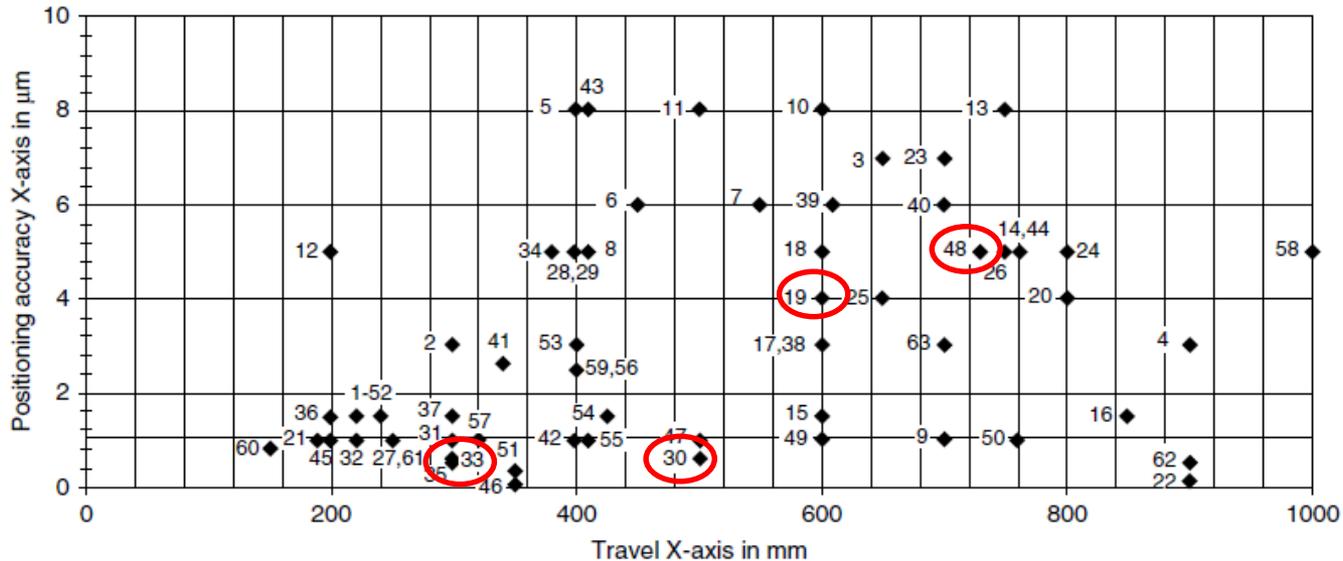
MÁQUINAS E COMPONENTES PARA TORNEAMENTO COM DIAMANTE

Tecnologia de Servo-Ferramenta Rápida



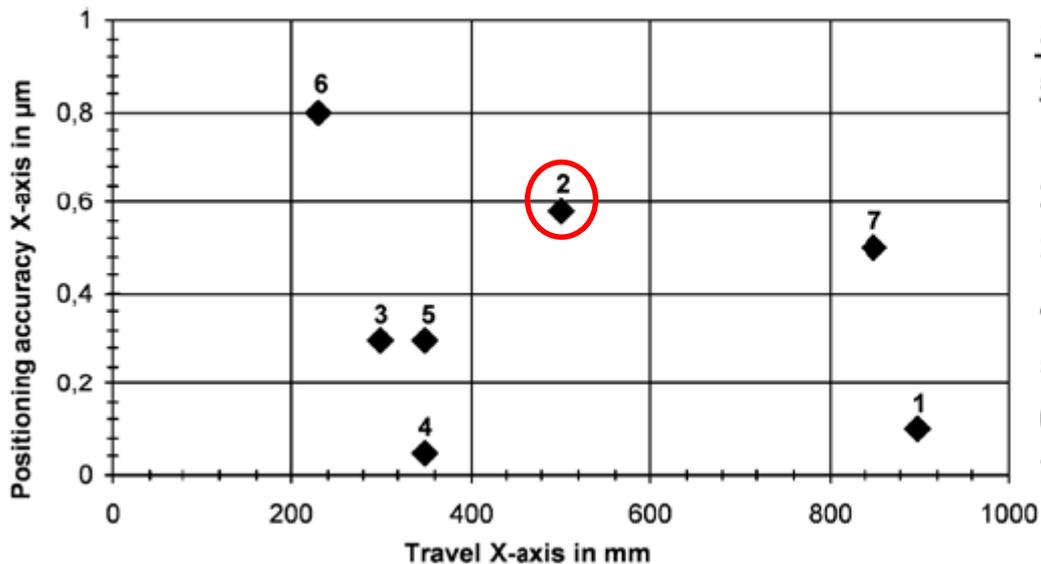
Drum lathe Nanotech HDL-2000

MÁQUINAS DE FRESAMENTO DE PRECISÃO



1 Almac CU 1005	17 Fidia HS664 RT	→ 33 Kern twenty five	49 OKK VP 4005AX
2 Almac FC 1105	18 Hedelius RS 60 Single	34 Knuth Twinmaster 380	50 OKK VG 5000
3 Alzmetall GS 650/5-T	→ 19 Hermle C20	35 Kugler Micromaster	51 Precitech Freeform 700
4 Breton XCEEDER 900RT	20 Hermle B300	36 Kugler Microgantry gf1	52 Primacon PFM 24 NGD
5 Bridgeport XR300 5AX	21 Hawema PRÄZISA	37 Kugler Microgantry micro	53 Primacon PFM 4024-5D
6 Chiron FZ 08K S MAGNUM	22 Hemtech Nano-Focus	38 MAG CFV 5	54 Rödgers RXP 500 DSC
7 Chiron FZ 12K S	23 Hüller Hille NBH 500	39 MCM Concept 2g	55 Roku Roku Mega S
8 Compumill HMC 140	24 Hurco VTX U	40 MCM Clock 700	56 Satisloh G1
9 Dixi DHO 50	25 Huron K2X 8 Five	41 Michael Deckel s20e	57 Schütte WU 305
10 DMG DMC 60 U	26 Hwacheon M2 -5AX	42 Michael Deckel s22P	58 Serrtech M3
11 DMG DMU 50 eVo	27 i-mes Premium 3020	43 Micron HSM 400 U	59 StarragHeckert STC 100
12 DMG Ultrasonic 20 linear	28 i-mes Premium 4030 μ	44 Millac Mu-400VA	60 UPM μtramill
13 Emag W04-12	29 i-mes Premium 4820 μ	45 MitsuiSeiki VL30 5X	61 WilleminMacodel W-408s
14 Fadal VMC 3016 FX	→ 30 Kern Pyramid Nano	46 Moore Nanotech 350FG	62 YASDA YBM VI40
15 Famup LINEARMILL 600 HD	31 Kern Evo	47 Moore Tool 500 CPZ	63 YCM FX350A
16 Fidia G996RT	32 Kern Micro	→ 48 Mori Seiki NMV5000 DCG	

MÁQUINAS DE FRESAMENTO DE PRECISÃO



Selection of high-precision 5-axis machines

- 1 Hemtech NanoFocus
- 2 Kern Pyramid Nano ←
- 3 Kugler MicroMaster
- 4 Moore Nanotech 350FG
- 5 Precitech Freeform 700
- 6 Upm μltramill
- 7 Yasda YBM Vi40

Mercado de máquinas 5-axis (precisão de posicionamento linear < 1 μm)

MÁQUINAS DE FRESAMENTO DE PRECISÃO

Specification "Hemtech NanoFocus"



■ Installation surface	14,4 m ²
■ Axes arrangement	Cross table structure, Rotary / swivel table
■ Bearing	Hydrostatic (linear and rotation)
■ Drive system	Direct drive, Torque motor
■ Measuring	Optical, 10 nm res.
■ Travel and angle	900 × 500 × 350 mm ³ 130°, 360° endless
■ Speed of main spindle	< 40.000 min ⁻¹
■ Positioning accuracy	< 0,1 μm (X-axis)

MÁQUINAS DE FRESAMENTO DE PRECISÃO

Specification
“Yasda YBM Vi40”



■ Installation surface	10,2 m ²
■ Axes arrangement	Bench-top design with a rotary / swivel unit
■ Bearing	Hydrostatic (linear) Friction (rotation)
■ Drive system	Ball screw, worm drive
■ Measuring	Optical, 100 nm res.
■ Travel and angle	850 × 450 × 450 mm ³ ±110°, 360° endless
■ Speed of main spindle	<24.000 min ⁻¹
■ Positioning accuracy	<0,5 μm (X-axis)

MÁQUINAS DE FRESAMENTO DE PRECISÃO

Specification “Kern Pyramid Nano”



■ Installation surface	3,4 m ²
■ Axes arrangement	Bench-top design with a rotary / swivel unit
■ Bearing	Hydrostatic (linear) Friction (rotation)
■ Drive system	Direct drive, Torque motor
■ Measuring	Optical, 20 nm res.
■ Travel and angle	500 × 500 × 400 mm ³ 130°, 360° endless
■ Speed of main spindle	< 50.000 min ⁻¹
■ Positioning accuracy	< ± 0,3 μm (X-axis)

MÁQUINAS DE FRESAMENTO DE PRECISÃO

Specification "Kugler MicroMaster"



■ Installation surface	11,7 m ²
■ Axes arrangement	Bench-top design with a rotary / swivel unit
■ Bearing	Hydrostatic (linear) Roller (rotation)
■ Drive system	Linear direct drive, Torque motor
■ Measuring	Optical, 0,25 nm res.
■ Travel and angle	300 × 300 × 250 mm ³ ±110°, 360° endless
■ Speed of main spindle	< 200.000 min ⁻¹
■ Positioning accuracy	< ± 0,3 μm (X-axis)

MÁQUINAS DE FRESAMENTO DE PRECISÃO

Specification "Upm / Brunel μtramill"



- | | |
|------------------------|---|
| ■ Installation surface | 1,9 m ² (system) |
| ■ Axes arrangement | Bench-top design
with a rotary / swivel unit |

-
- | | |
|--------------------------------|---|
| ■ Bearing
(linear, rotary) | Aerostatic, roller
beared / aerostatic |
| ■ Drive system | Linear direct drive,
Torque motor |
| ■ Measuring | Optical, 5 nm res. |

-
- | | |
|-------------------------|---|
| ■ Travel
and angle | 230 × 225 × 160 mm ³
±90°, 360° endless |
| ■ Speed of main spindle | <200.000 min ⁻¹ |
| ■ Positioning accuracy | <0,8 μm (X-axis) |