

## **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE FIXAÇÃO E AJUSTAGEM DE FERRAMENTA PARA USINAGEM DE ULTRAPRECISÃO.**

**Rodolfo G. Rabe\*, Fernando A. Forcellini\*, Günter Höhne\*\*, Walter L. Weingaertner\***

\* Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Mecânica.  
Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos - Nedip.  
Campus da UFSC – Florianópolis, SC, Brasil - CEP 88040-900, CP 476, e-mail:  
[rgr@certi.ufsc.br](mailto:rgr@certi.ufsc.br)

\*\* Technische Universität Ilmenau - Institut für Maschinenelemente und Konstruktion  
Ilmenau, Germany, e-mail: [guenter.hoehne@Maschinenbau.tu-ilmenau.de](mailto:guenter.hoehne@Maschinenbau.tu-ilmenau.de)

### **Resumo**

Em uma usinagem de ultraprecisão, a correta ajustagem da ferramenta é um fator de influência para a obtenção de componentes com alto acabamento superficial e alta precisão dimensional e de forma. Para que essas ajustagens sejam realizadas, está sendo desenvolvido esse trabalho, que visa apresentar as etapas do projeto de um porta-ferramenta para ser utilizado em usinagem de ultraprecisão, enfatizando os requisitos de projeto do sistema para micro posicionamento/micro deslocamento. Como características desejadas para esse porta-ferramenta, destaca-se a alta rigidez e posicionamento micrométrico, além de características modulares de construção e utilização.

**Palavras-chave:** Porta-ferramenta, ultraprecisão, ajustagem, modularidade, usinagem.

### **Introdução**

A usinagem de ultraprecisão se desenvolve impulsionada não apenas pela necessidade dos meios científicos em se obter componentes de forma complexas, precisos ou de acabamento superficial sub-micrométrico, mas também pelas indústrias que desejam produzir bens de consumo com alta qualidade e custo acessível.

Para isso, o projeto e desenvolvimento de mecanismos para se usinar esses componentes se tornam uma parte importante no entendimento do quebra-cabeça multidisciplinar que é construir elementos e máquinas-ferramentas para a usinagem de ultraprecisão.

O porta-ferramenta é uma peça crítica na usinagem por torneamento, pois ele é o elemento final da cadeia estrutural entre a ferramenta e a peça que está sendo usinada. Infelizmente sua importância é normalmente ignorada no projeto de uma máquina ferramenta, devido ao seu pequeno tamanho e robustez [1].

Entretanto robustez não significa necessariamente alta rigidez, sendo os requisitos e preocupação para um posicionamento conveniente e correto da ferramenta, normalmente predominam sobre a rigidez, abrindo caminho para que ruídos interfiram no resultado final de uma usinagem.

O ajuste correto da ferramenta é sempre um fator importante em qualquer usinagem. No entanto na usinagem de ultraprecisão, principalmente de elementos ópticos, um perfeito ajuste da ponta da ferramenta é imprescindível, pois poucos micrometros fora da região ideal, é o suficiente para tornar necessário um retrabalho ou, em um caso extremo, a perda do componente que está sendo usinado.

Com base nesses fatos, tem-se como objetivo desse trabalho apresentar as etapas iniciais do projeto de um porta-ferramenta que possibilite a correta ajustagem da ponta da ferramenta em relação à peça e ao torno, com posicionamento micrométrico e com o compromisso de se obter uma rigidez adequada em uma usinagem de ultraprecisão.

### **Usinagem de ultraprecisão com ferramenta de diamante monocristalino.**

A demanda de componentes que tenham alta precisão dimensional e acabamento superficial sub-micrométrico tais como substratos para fotocopiadoras e discos rígidos, elementos ópticos (lentes e espelhos), mancais aerostáticos, etc. ampliaram os limites da usinagem com ferramenta de geometria definida<sup>1</sup>, como processo de fabricação, contribuindo para o desenvolvimento de uma área, chamada de usinagem de ultraprecisão.

A usinagem de ultraprecisão com ferramenta de diamante, proveu os meios de se produzir uma desejada superfície óptica normalmente em uma única operação, resultando em tamanho, forma e acabamento superficial em um único processo de remoção de material.[2]

Com isso, pôde-se observar algumas mudanças na área de fabricação, sobretudo na produção de elementos ópticos. A eliminação de processos posteriores, como lapidação ou polimento, possibilitou uma redução nos custos de fabricação. A introdução de ferramentas ativas (*fast tools*) aos tornos de ultraprecisão, possibilitou a obtenção de lentes e espelhos de formas complexas, auxiliando no desenvolvimento de diversas áreas como física, medicina, astronomia e engenharias em geral, e com reflexos nas indústrias de bens de consumo.

Dominar o projeto e a construção de elementos relacionados à ultraprecisão, seja a própria máquina-ferramenta e seus módulos ou a fabricação de componentes usinados, se torna para o desenvolvimento científico e tecnológico um caminho natural, assim como para a produção de bens de alto valor agregado.

### **Requisitos de projeto**

A primeira etapa do trabalho foi definir quais ajustes da ferramenta serão necessários para que determinadas famílias de peças sejam produzidas. Da mesma maneira foram estabelecidas as faixas de operação envolvidas e requisitos complementares.

As famílias são tipos de superfícies que podem ser produzidas com uma determinada configuração do torno. Essa configuração, para esse caso, está diretamente ligada ao tipo de base em que o porta-ferramenta será instalado, o que na prática significa que o mesmo não será montado sobre um único tipo de base ou torno.

Para direcionar o trabalho, pois o objetivo final será a construção e qualificação do porta-ferramenta, foram selecionados três bases onde esse porta-ferramenta será utilizado, descritos nos itens abaixo e esquematizados nas fig. 1.4 e 1.6 da configuração do torno (Fig.1) :

- Sobre a base de um torno X-Y;
- Em um sistema de micro posicionamento da *Physik instrumente*, modelos M410 e M500, esquematizados na fig.1.4;
- Em uma base aerostática rotativa controlada numericamente, também esquematizados na fig. 1.4.

---

<sup>1</sup> Torneamento, fresamento, furação, etc.

Com isso, três famílias de superfícies poderão ser usinadas, respectivamente:

- Planas e cônicas;
- Superfícies geradas pela interpolação dos eixos da mesa micro posicionadora;
- Superfícies esféricas côncavas ou convexas.

Além disso, poderão haver combinações entre os três tipos de bases, podendo-se gerar no futuro superfícies anesféricas por exemplo.

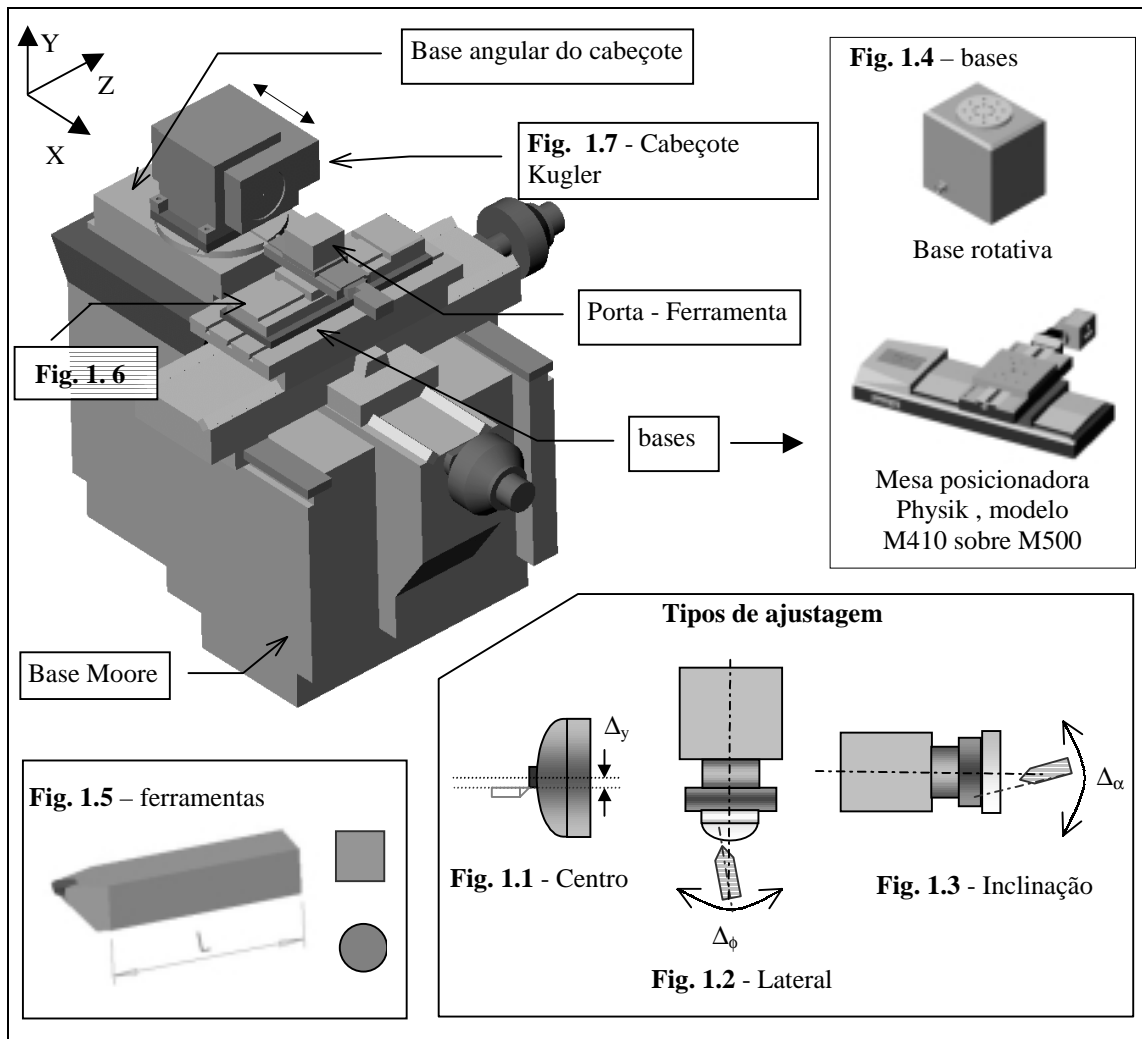
Com base nesses dados, uma tabela de requisitos foi montada (tabela1) assim como um esquema da configuração do torno (fig.1) em que será testado o porta-ferramenta. (Figuras 1.1 à 1.7).

**Tabela 1 - Requisitos iniciais de projeto**

<b>Fig.</b>	<b>Requisito - (plano)</b>	<b>Valor</b>	<b>Observações</b>
<b>1.1</b>	Alinhamento entre ferramenta e centro de rotação da árvore/cabeçote ( <b>Y-Z</b> ).	$\Delta_y \leq \pm 1\mu\text{m}$	
<b>1.2</b>	Alinhamento entre ferramenta e o torno ( <b>X-Z</b> ). Região de utilização do gume da ferramenta.	$\Delta_\phi \pm 15^\circ$	Em torno R- $\theta$ <sup>2</sup> , $\Delta_\phi \leq \pm 0.5^\circ$
<b>1.3</b>	Alinhamento entre ferramenta e peça de trabalho ( <b>Y-X</b> ).	$\Delta_\alpha \leq \pm 0.5^\circ$	
<b>1.4</b>	Tipos de base. * - Raio da base R- $\theta$ onde será instalado o porta-ferram.	Torno X-Y Mesa X-Y Mesa R- $\theta$ <sup>3</sup>	Menor base 100x100mm Base R * =40mm
<b>1.5</b>	Tipos de seções de ferramentas - haste. Retangular/circular/triangular * - Raio da haste da ferramenta de seção circular	Máx = 12 x 12mm Máx. R * = 5mm Lmax. = 50mm	Min. = 5 x 5mm Min. R * = 2mm Lmin. = 20mm
<b>1.6</b>	Montagem do porta-ferramenta no torno Moore, sobre mesa posicionadora, base rotativa ou suas combinações.		Diferentes alturas
<b>1.7</b>	Permitir o deslocamento do cabeçote Kugler.	Espaço entre base móvel do cabeçote e base do porta-ferramenta.	Espaço depende do tipo de base utilizada.
	Peso total.	Máx 200 N	Max permitido pela mesa M400
	Posicionamento manual - mecânico/eléto - eletrônico		Possibilidade de automação.

<sup>2</sup> Torno R- $\theta$  diferencia-se do torno X-Y por se utilizar como parâmetros a distância da ponta da ferramenta em relação ao centro de rotação da base e o avanço da ferramenta ser angular, proporcionada pela rotação da base.

<sup>3</sup> Tipo de base característica do torno R- $\theta$



**Figura 1 - Configuração do torno**

## Módulos

Para facilitar o projeto do porta-ferramenta, o mesmo foi dividido em cinco módulos:

- Base do porta-ferramenta – Que tem a função de prover uma base a ser fixada em uma das configurações descritas anteriormente, levando-se em consideração a necessidade de não se obstruir a movimentação do cabeçote.
- Sistema de macro posicionamento – Que tem a função de compensar a diferença de altura entre várias configurações de bases e o uso de ferramentas de diferentes seções.
- Sistema de micro posicionamento – Encarregado do micro posicionamento da ferramenta nas situações descritas na tabela 1.
- Sistema de fixação da ferramenta – Que possa utilizar a maioria das ferramentas de diamante monocristalino do mercado.
- Sistema de acionamento/posicionamento – O sistema será modular, podendo-se optar por soluções totalmente mecânicas de acionamento ou soluções eletro/eletrônica a serem usadas futuramente em conjunto com um sistema de *set-up* da posição da ferramenta.

## Sistema de micro posicionamento



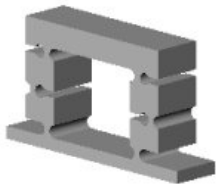
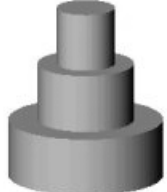
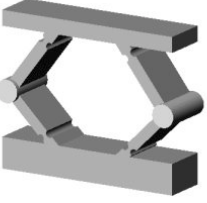

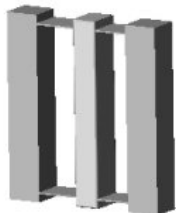

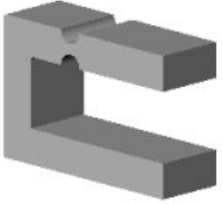
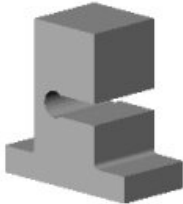
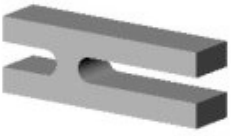


A primeira ajustagem a ser estudada é o posicionamento da ponta da ferramenta em relação ao eixo de rotação do cabeçote, ou seja, o posicionamento da altura da ferramenta.

A importância de se usinar até o centro é para evitar uma deterioração da planicidade da peça, principalmente em elementos ópticos, como por exemplo espelhos para laser.

O objetivo é posicionar a ponta da ferramenta à uma distância de  $\pm 1\mu\text{m}$  do centro de rotação, levando-se em consideração um sistema que permita um curso de ajustagem razoável, com pequenos incrementos e com uma alta rigidez.

Para isso se foi montada a tabela 2, com os princípios de soluções pesquisados.

**Tabela 2 – Sistemas de micro posicionamento**

<b>Lineares</b>			
			
Conversor angular-linear	Planos	Mola com acionamento central.	Telescópico
			
Plataforma com acionamento horizontal	Guias paralelas	Guia central	Mola membrana/prato
<b>Angulares</b>			
			
Viga em balanço	Haste em balanço	Dupla viga em balanço	
<b>Múltiplos graus de liberdade</b>			
			
Plataforma		Disco	

## Sistema de acionamento

Aliado ao tipo de posicionamento, outro fator importante é o tipo de acionamento que será utilizado. Algumas opções podem ser vistas na tabela 3.

A escolha dos que melhor se adaptam ao projeto de um sistema de ajustagem da ferramenta será função de:

- Intercambiabilidade
- Rigidez
- Facilidade de controle/posicionamento
- Construção/implementação
- Estabilidade no tempo
- Curso
- Custo


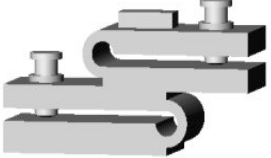


Cada sistema de micro posicionamento apresentado na tabela 2 possui um sistema de acionamento (tabela 3) que lhe irá conferir as melhores características de posicionamento com alta rigidez. A avaliação das melhores combinações será feita em função dos itens apresentados anteriormente, com a ajuda de *softwares* e analisando-se os sistemas existentes no mercado e/ou em artigos e outras literaturas relacionadas.

Como exemplo de combinações que podem ser geradas, tem-se as apresentadas na tabela 4.

**Tabela 3 – Sistemas de Acionamento**

Mecânicos	<i>Smart materials</i>	Conjuntos
Micrômetros	Eletrostáticos	Lineares magnéticos
Planos inclinados	Piezoelétricos	<i>Voice/magnetic coil</i>
Cames/superfícies	Magnetoestritivo	<i>Walking drive/worm</i>
Roda de atrito	Eletroestritivo	Hidráulico/pneumático
Dilatação/contração térmica	Efeito memória (SMA)	Fusos

**Tabela 4 – Exemplos de combinações**

Combinações			
 came-seguidor	 Nivelador com viga em balanço e parafuso micrométrico	 Plano-viga	 Viga com acionamento horizontal.

## Conclusão e trabalhos futuros

A usinagem de ultraprecisão permite que novos processos de fabricação sejam desenvolvidos, seja para produzir antigos componentes com um melhor acabamento e mais baratos ou para novos projetos, principalmente de elementos ópticos.

Um correto posicionamento da ferramenta é necessário em uma usinagem por torneamento, sobretudo quando se trata de uma usinagem de ultraprecisão, onde poucos micrômetros são mais que suficientes para comprometer, por exemplo, a planicidade de um elemento óptico.

Para um correto *set-up* da ferramenta, deve-se determinar primeiramente quais ajustagens são relevantes e prover os meios necessários para que isso possa ser feito, sobretudo com facilidade mas sem comprometer a rigidez do sistema. A função do porta-ferramenta a ser projetado é possibilitar esses ajustes independente da configuração do torno ou da superfície a ser gerada.

A divisão do porta-ferramenta em módulos facilita o projeto e evita a sobreposição de funções em uma única peça, o que normalmente acarreta em um aumento nos graus de liberdade do sistema e uma conseqüente deterioração da rigidez do conjunto. Cada um dos módulos irá ser trabalhado e testado nas próximas etapas do trabalho.

A primeira etapa foi a apresentação dos princípios de soluções de sistema de micro posicionamento assim como alguns tipos de acionamentos. Essa etapa não somente irá servir para estabelecer o princípio de posicionamento/acionamento que será utilizado na construção do porta-ferramenta mas também poderá ser utilizada na elaboração de novos módulos, como controle da profundidade de corte e até na construção de um *fast-tool*.

## **Agradecimentos**

A *Technische Universität Ilmenau* – especificamente pela visita técnica ao *Institut für Maschinenelemente und Konstruktion* e pelo apoio de seus integrantes;

Ao Laboratório de Mecânica de Precisão da UFSC – LMP –, especialmente ao Milton Pereira e Rodrigo Stoeterau.

## **Referências**

1. Franse, J., Roblee, J., “A Survey of the Dynamic Characteristics of Toolholders for Diamond Turning”.
2. McClure, E., 1994, “*A Perspective on the Future of Precision Engineering Industry*”, Advancement of Intelligent Production, Elsevier Science B.V/ JSPE. pp.K31-K37
3. Smith, S. T., Chetwynd, D. G., 1994, “*Foundations of Ultraprecision Mechanism Design*”, Gordon and Breach Science Publisher.
4. Slocum, A. H., 1992, “*Precision Machine Design*”, Prentice-Hall Inc.
5. Taniguchi, N., 1996, “*Nanotechnology : Integrated Processing Systems for Ultra-Precision and Ultra-Fine products*”, Oxford Univ. Press.
6. Montanari, L., Duduch, J. G., Rubio, J.C.C, 1999, “*Design of an Angular Positioner for Precision Machines*”, Proceedings of the 1<sup>st</sup> International EUSPEN Conference, pp. 128-131
7. Krause, W., 1993, “*Konstruktionselemente der Feinmechanik*”, Hanser
8. Zhu, J., 1995, “*Several Design for Ultrahigh Resolution Optical Positioning Components*”, Proceedings of Optomechanical and Precision Instrumente Design, SPIE Vol. 2542. pp. 207-211