



## **ASPECTOS DE PROJETO DE UMA MESA ANGULAR ROTATIVA PARA CORREÇÃO DIMENSIONAL DURANTE A USINAGEM DE ULTRAPRECISÃO**

### **Carlos Umberto Burato**

Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).  
Av. Trabalhador São-Carlense, nº 400, Centro - CEP: 13566-590 – São Carlos – SP.  
cburato@sc.usp.br

### **Jaime Gilberto Duduch**

Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).  
Av. Trabalhador São-Carlense, nº 400, Centro - CEP: 13566-590 – São Carlos – SP.  
jgduduch@sc.usp.br

### **Luciana Montanari**

Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).  
Av. Trabalhador São-Carlense, nº 400, Centro - CEP: 13566-590 – São Carlos – SP.  
montanar@sc.usp.br

### *Resumo*

*Este trabalho tem como objetivo estudar os aspectos de projeto de uma mesa angular com a finalidade de corrigir dimensionalmente peças anesféricas, durante a usinagem de ultraprecisão, de forma a satisfazer as tolerâncias nanométricas. Define-se o microposicionamento angular através de atuadores piezoelétricos, relata-se o problema encontrado para energizar os atuadores, devido ao acionamento ser de rotação e mostra-se a alternativa encontrada destacando-se os seguintes pontos relevantes: a) energização através de anéis coletores deslizantes, de cobre, fixados no diâmetro externo do dispositivo; b) isolamento elétrico entre os anéis e a peça; c) ligação do cabo coaxial vindo dos atuadores piezoelétricos; d) aterramento dos cabos coaxiais, utilizando apenas um anel coletor deslizante. Explica como acontece a transferência de corrente elétrica do aparelho de controle para os anéis deslizantes e atuadores piezoelétricos, utilizando contatos através de escovas, com 65% de prata e 35% de grafite, com molas duplas para garantir a pressão do contato, fixadas numa base rígida externa ao dispositivo. Destaca que a confiabilidade no microposicionamento da peça está na preservação da passagem da corrente elétrica de 50mA para os atuadores. Conclui que é possível manter um controle dimensional durante a usinagem de ultraprecisão, através do microposicionamento angular da peça que está sendo trabalhada, garantindo assim suas tolerâncias nanométricas.*

*Palavras chaves: microposicionamento, atuadores piezoelétricos e ultraprecisão*

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. Introdução**

Os produtos de alta tecnologia tais como os componentes da óptica, informática, mecânica de

precisão e microeletrônica exigem atualmente uma precisão dimensional e qualidade superficial nanométrica.

Estes componentes, que possuem requisitos nanométricos devem ser fabricados em máquinas-ferramenta de ultraprecisão que, em termos de projeto, devem cobrir três aspectos principais: a estrutura; os sistemas de posicionamento e o sistema de controle, Vásquez (1994). Com relação à estrutura, esta deve garantir o isolamento das vibrações induzidas pelo meio externo e diminuição das auto-induzidas pelo processo de usinagem. O sistema de posicionamento deve ser suficientemente rígido para evitar problemas de ressonâncias mecânicas devidas as interações entre folgas elásticas e os componentes inerciais, ter baixo atrito para evitar problemas como *stick-slip* e possuir baixa inércia para obter-se uma boa resposta dinâmica do sistema. Quanto ao sistema de controle, os critérios de projeto mais importantes são: garantir erros submicrométricos de posicionamento e seguimento de trajetórias e a obtenção de movimentos suaves e uniformes, especialmente em baixas velocidades.

Portanto, verifica-se que em máquinas-ferramenta de ultraprecisão os altos níveis de precisão requeridos, somente podem ser atingidos pela correta combinação dos sistemas de acionamento, guias, medição e controle, sendo que a integração destes componentes mecânicos, eletrônicos e ópticos devem ser capazes de responder com rapidez e precisão a sinais de entrada de pequena amplitude, boa resposta de posicionamento e alta qualidade de movimento.

## **1.2. Objetivo**

Estudar os aspectos de projeto de uma mesa angular rotativa, como um subconjunto de um sistema de acionamento, enfocando o microposicionamento relativo ferramenta/peça, como na compensação de erros sistemáticos presentes.

## **2. ASPECTOS DO PROJETO**

### **2.1. Considerações Gerais**

Máquinas para usinagem de ultraprecisão necessitam de sistemas de posicionamento e sistemas de correção dos erros provindos dos elementos componentes da máquina. É a maneira mais direta de se alcançar a precisão desejada, porque em projetos de ultraprecisão não se deve tentar aumentar a precisão da máquina aumentando o máximo a precisão de cada elemento, pois os custos tornarão o projeto proibitivo, Purquério et al (1994).

Basicamente, um sistema de posicionamento tem como objetivo movimentar um objeto ao longo de uma trajetória pré-determinada até uma posição desejada, em geral por meio de energia mecânica, ou seja, os sistemas posicionadores são construídos com o propósito de estabelecer posições relativas entre elementos de um mesmo sistema; por exemplo, o posicionamento de uma ferramenta em relação a uma peça a ser usinada em uma máquina-ferramenta. Na usinagem de ultraprecisão se requer um rígido controle do perfil a ser usinado, assim surge a necessidade de obterem-se movimentos na faixa micrométrica.

O projeto de um sistema posicionador é efetuado de tal modo que ele se comporte, tanto quanto possível, como um corpo rígido. Existem sistemas de posicionamento que possuem movimentos de translação e/ou rotação, podendo apresentar um ou mais graus de liberdade, Asano et al (1991).

A busca por sistemas posicionadores cada vez mais precisos tornou necessária a construção de equipamentos de melhor qualidade e a elaboração de novos métodos para a identificação e minimização dos erros de posicionamento, causados em sua maioria devido a presença de fatores perturbadores de origem interna ou externa aos equipamentos. Esta minimização pode ser obtida através da otimização dos elementos que compõe os sistemas posicionadores ou através da compensação de erros, utilizando-se atuadores de alta exatidão, resolução e velocidade de posicionamento, além de alta rigidez quando comparados aos equipamentos convencionais, Watanabe (1992).

Para o projeto proposto é prevista a utilização de um sistema de microposicionamento, mesa angular rotativa, no torno CNC (ASG 2500 Rank Pneumo do Laboratório de Ultraprecisão), como pode ser observado no esquema de localização da Fig. (1), Montanari (1999).

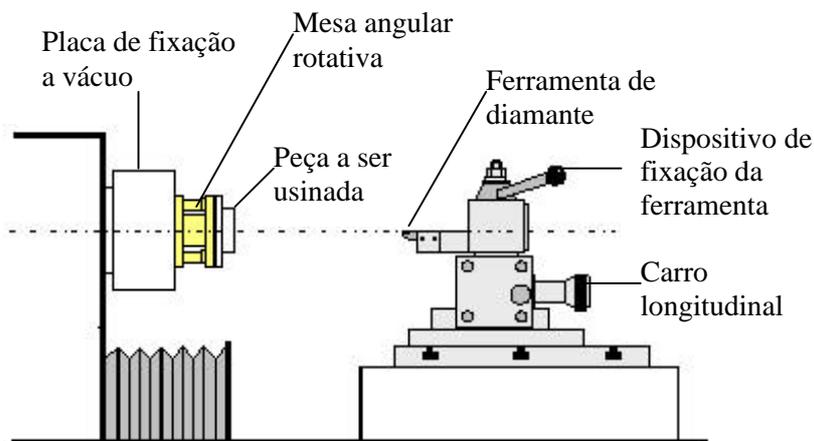


Figura 1. Esquema de localização do posicionador

### 3. ESTUDO PRELIMINAR E DEFINIÇÃO DO MODELO

#### 3.1. Estudo Preliminar

Será considerado, inicialmente, um modelo de posicionador a ser fixado em uma base estacionária e após o estudo e definição desse modelo será feito o projeto para que este posicionador, mesa angular rotativa, seja acoplado numa base móvel, placa de fixação a vácuo giratória do torno, conforme foi mostrado na Fig. (1).

Para este estudo devem ser consideradas algumas características relevantes para um posicionador que já foram descritas, como: alta rigidez; baixo atrito; baixa inércia e alta exatidão, resolução e velocidade de posicionamento, auxiliando tanto no posicionamento relativo ferramenta/peça quanto na compensação de erros sistemáticos. Analisando estes fatores, o possível projeto, conforme Fig. (2), congrega elementos importantes, que são: a) mancal de flexão, sistemas flexíveis ajudam na eliminação de folgas mecânicas, não influenciando na rigidez, pois a parte móvel (com efeito mola) é unida na parte fixa por parafusos, formando um sistema rígido; b) apoio cinemático, o posicionador deve ser unido a parte móvel (mola) através de apoio cinemático, ou seja, livre de tensões internas. Esse apoio pode ser constituído de três canaletas em “V” (no mancal de mola) e três esferas, componentes da haste do atuador; c) plataforma de *Stewart*, o sistema permite a correção ou o posicionamento angular através da movimentação de atuadores, permitindo a obtenção do movimento com três graus de liberdade, um de translação e duas rotações e d) atuadores piezoelétricos, foram escolhidos devido a várias vantagens, como: permitir resoluções nanométricas de posicionamento, através do controle de tensão aplicada e a utilização de sensores de posição adequados; não possuem folgas nem partes móveis, sua expansão é conseguida exclusivamente pela deformação sólida do material cristalino, Tavares (1995); alta eficiência na conversão de energia elétrica em movimento; capacidade de suportar altas cargas (até 30.000N) e ampla largura de banda, sua velocidade de expansão é limitada apenas pela velocidade do som no material cristalino, Physik Instrumente (1992).

Quando processado debaixo de certas condições, alguns cristais e polímeros exibem o fenômeno da interação entre os campos elétricos e os componentes mecânicos. Este fenômeno é conhecido como piezoelectricidade, o qual tem sido objeto de muitas pesquisas, Sunar (2001).

Um material piezoelétrico tem uma estrutura cristalina que produz uma voltagem em sua superfície quando tracionado ou comprimido, Slocum (1992). Como substâncias cristalinas de um atuador piezoelétrico, são empregados materiais cerâmicos sinterizados, a base de bário (Ba),

chumbo (Pb), titânio (Ti) e zircônio (Zr), que são baseados na propriedade de induzir carga elétrica proporcional à mecânica aplicada, Tavares (1995).

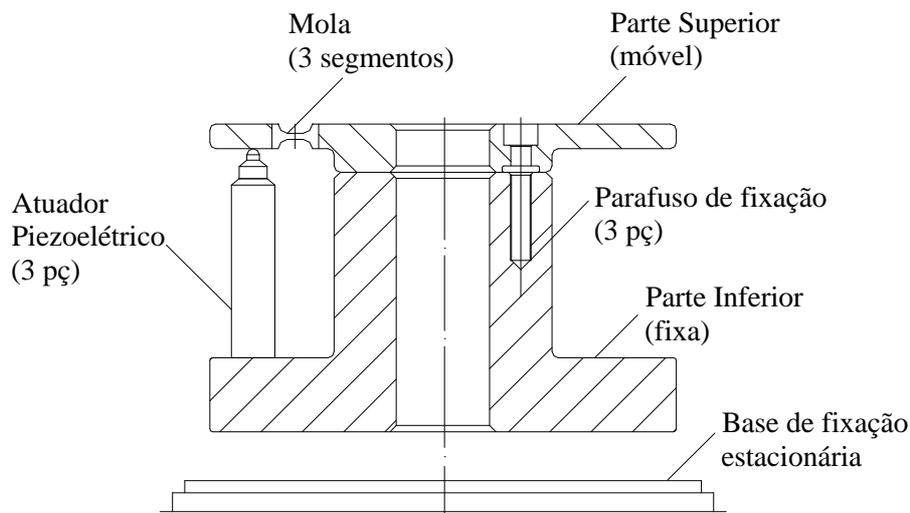


Figura 2. Modelo de posicionador para uma base de fixação estacionária

### 3.2. Definição do Modelo

Conforme mostrado na Fig. (2), foi definido um modelo de posicionador a ser fixado em uma base estacionária.

A situação real para o projeto da mesa angular rotativa é que sua fixação deve ser feita em uma placa de vácuo giratória. O principal problema é como energizar os atuadores piezoelétricos, pois todo o conjunto tem movimento de rotação. A primeira alternativa proposta para solucionar este problema é fixar um anel deslizante no centro da mesa angular rotativa. Para conectar o cabo coaxial do atuador no anel deslizante, faz-se um furo no cubo do posicionador, conforme mostra a Fig. (3). Entretanto, não existe a possibilidade de acoplar a mesa angular rotativa na placa de fixação a vácuo giratória, devido ao cabo coaxial estar posicionado entre as duas partes a serem acopladas, Fig. (3). Sendo assim, não foi possível prosseguir com este modelo de projeto de posicionador.

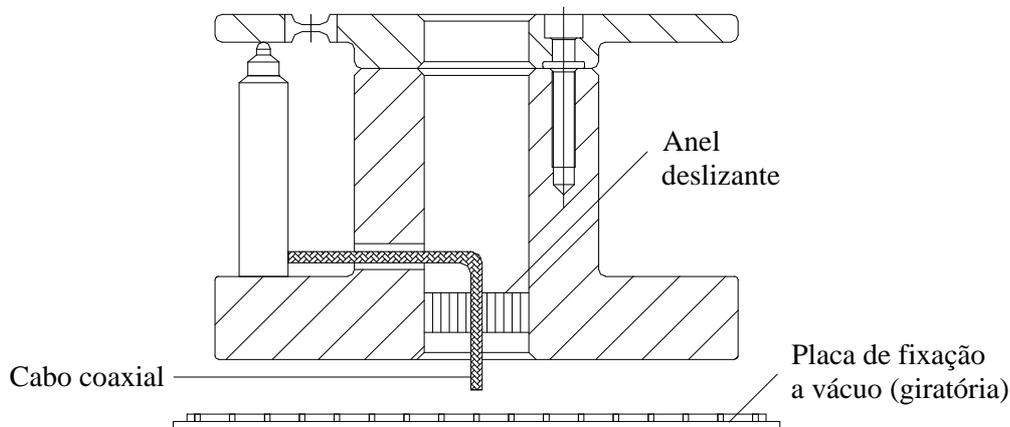


Figura 3. Modelo de posicionador com anel deslizante central

Após estudar o princípio de funcionamento de anéis deslizantes, que consiste basicamente de uma parte fixa e escovas que transferem a energia vinda da fonte de alimentação para a parte móvel,

que são os anéis deslizantes, optou-se por este princípio de funcionamento para a concepção do projeto da mesa angular rotativa. Foi idealizado que todo o conjunto do posicionador com anéis coletores será a parte móvel e que externo a ele haverá uma parte fixa e rígida composta pelas escovas.

Como pode ser observado na Fig. (4), foi fixado na parte externa aos posicionadores três anéis coletores deslizantes, de cobre, sendo dois anéis responsáveis pela energização, transferência de corrente elétrica para os atuadores e um anel que tem a função de fazer o aterramento do sistema. Existem também dois tipos de isolamento elétrico realizada por anéis de fibra de vidro, uma isolamento é feita entre os anéis deslizantes e o posicionador e a outra isolamento é feita entre os próprios anéis coletores, evitando assim a criação de correntes elétricas parasitas, permitindo preservar a transferência da corrente elétrica, em torno de 50mA. Os cabos coaxiais dos atuadores chegam até os anéis deslizantes através de dois furos feitos no posicionador, Fig. (4). O sistema que energiza os anéis coletores é composto pelo porta-escovas que é posicionado em uma parte fixa e rígida da máquina-ferramenta e pelas escovas, interligadas a fonte de alimentação. O porta-escovas possui um sistema duplo de molas, que garante a pressão de contato, escova-anel coletor. As escovas são confeccionadas com 65% de prata e 35% de grafite. Estas características, das escovas e do porta-escovas, garantem que o sistema de transferência de corrente elétrica seja satisfatório e confiável para a aplicação pretendida.

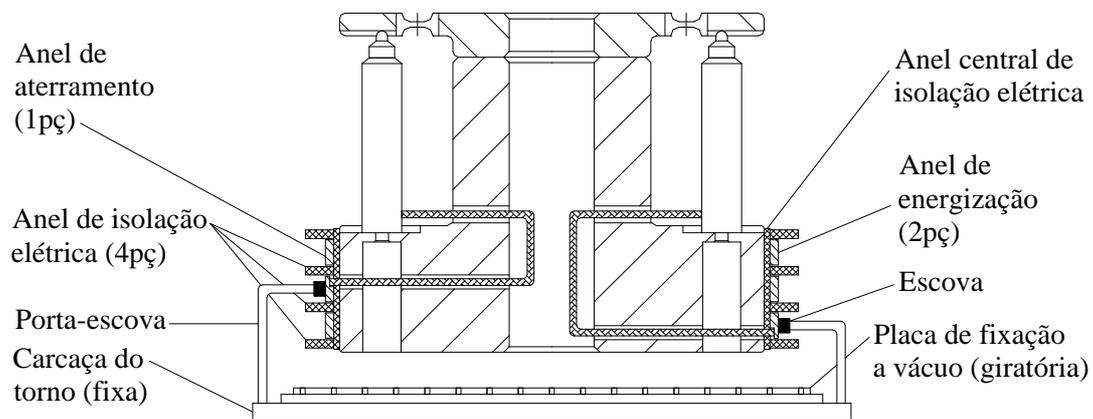


Figura 4. Modelo de posicionador com anéis coletores e escovas

Na elaboração do projeto da mesa angular rotativa foram estudados os possíveis problemas durante a transferência de energia da fonte de alimentação para os atuadores piezoelétricos, pois a confiabilidade no microposicionamento da peça a ser usinada está na preservação desta transferência de corrente elétrica para os atuadores.

O fluxo de transferência de energia, passagem de corrente elétrica, pode ser observado de acordo com o esquema da Fig. (5).

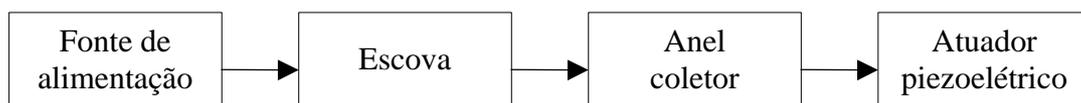


Figura 5. Fluxo de transferência de corrente elétrica

Como um anel coletor é dedicado ao aterramento, a escova que faz o contato com este anel é interligada, por meio de fios elétricos, ao terra da máquina-ferramenta, conforme esquema mostrado na Fig. (6).

Verifica-se então, que com os sistemas de transferência de corrente elétrica e aterramento expostos, foi solucionado o problema de energização dos atuadores piezoelétricos.

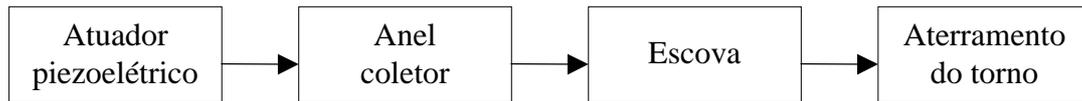


Figura 6. Fluxo de energia para o aterramento do sistema

#### 4. SIMULAÇÃO

Para verificar a funcionalidade do mecanismo, serão apresentados alguns resultados obtidos a partir de uma simulação numérica. A simulação corresponde as variações nos ângulos  $\theta_1$  (giro com relação ao eixo X) e  $\theta_2$  (giro com relação ao eixo Y), conforme mostra a Fig. (7).

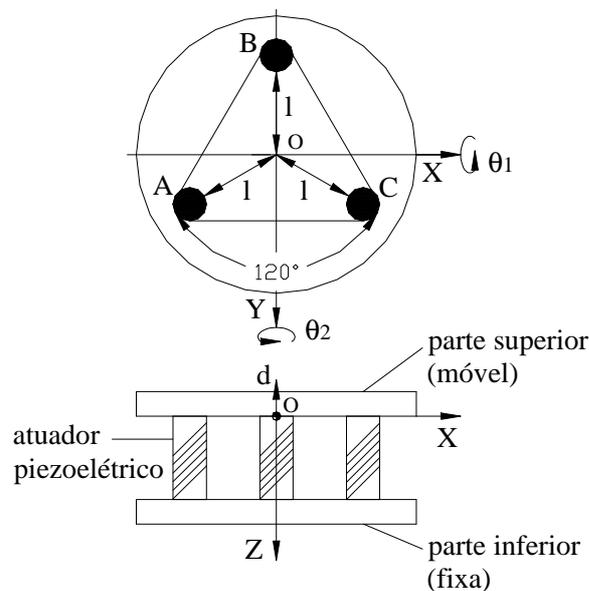


Figura 7. Posição do sistema absoluto de coordenadas OXYZ e das variáveis  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $d$ ,  $l$

As variações destes ângulos ( $\theta_1$  e  $\theta_2$ ) são realizadas dentro do volume de trabalho da peça a ser usinada, de forma a observar os movimentos nos atuadores, permitindo assim, a realização de uma trajetória pré-determinada, considerando-se a translação do ponto central do posicionador na direção de Z nula, ou seja  $d=0$  e a distância dos atuadores,  $l=60\text{mm}$ .

A ferramenta computacional utilizada para auxiliar na realização deste estudo foi o *software* MATLAB<sup>TM</sup>, The Mathworks (1995) devido a facilidade de implementação das rotinas de cálculo, assim como a visualização gráfica dos resultados.

A Figura (8) mostra os resultados gráficos obtidos na simulação de um movimento angular combinado. Pode-se observar que os ângulos  $\theta_1$  e  $\theta_2$  variam dentro da faixa  $\pm 0,02^\circ$  e que os atuadores se movimentam na faixa de  $40\mu\text{m}$ , para as respectivas variações dos ângulos  $\theta_1$  e  $\theta_2$ .

#### 5. CONCLUSÃO

Pode-se manter um controle dimensional durante a usinagem de ultraprecisão, através do microposicionamento angular da peça que está sendo usinada, pois atingiu-se uma resolução de posicionamento submicrométrica, inferior a  $0,10\mu\text{m}$  num curso aproximado de  $40\mu\text{m}$ , garantindo assim as tolerâncias nanométricas requeridas. E, dentro das alternativas disponíveis para os elementos construtivos do sistema, é possível simplificar a plataforma de Stewart para dois

atuadores e um ponto articulado, pois são necessários somente dois graus de liberdade, giros em torno de X e de Y.

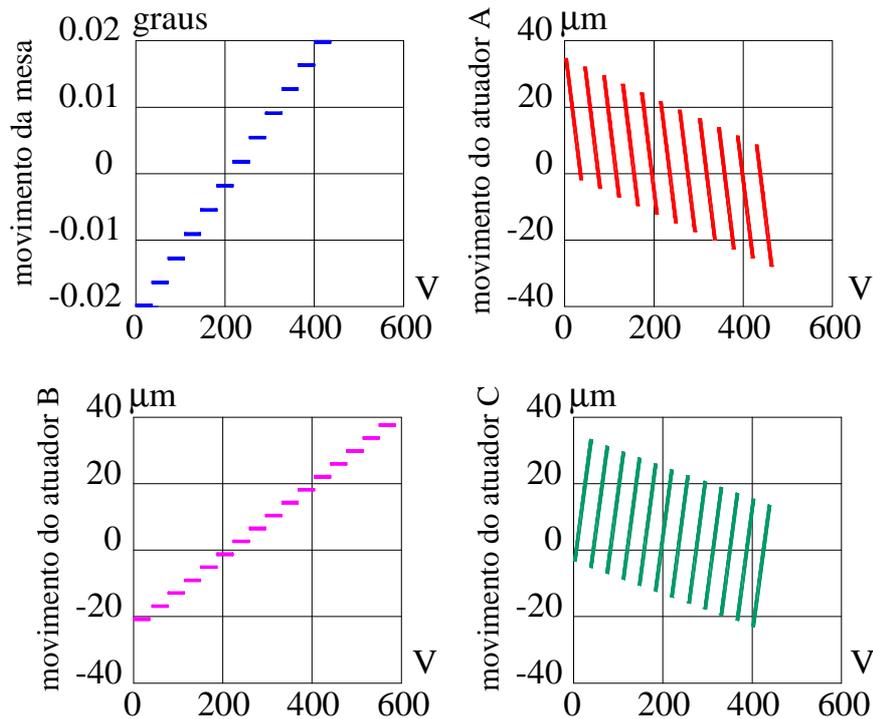


Figura 8. Variação dos ângulos  $\theta_1$  e  $\theta_2$  para  $l=60\text{mm}$

## 6. REFERÊNCIAS

- Asano, S. e Goto, T., 1991, "Micropositioning Stage of 6 Degree-of-Freedom with Nanometer Resolution", Progress in Precision Engineering, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, Germany.
- Montanari, L., 1999, "Técnicas de Projeto Aplicadas no Desenvolvimento de um Microposicionador Angular", São Carlos, Tese de Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
- Physik Instrumente (PI) GmbH & Co, 1992, General Catalog, Germany.
- Purquério, B. M., Penteadó, L. A., França, S. C. e Fortulan, C. A., 1994, "Máquina de Ultraprecisão: Um Projeto Desenvolvido no Brasil", Máquinas e Metais, pp. 152-163, mar.
- Slocum, A. H., 1992, "Precision Machine Design", New Jersey, Prentice-Hall, Inc.
- Sunar, M., Hyder, S. J. e Yilbas, B. S., 2001, "Robust Design of Piezoelectric Actuator for Structural Control", Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 190, pp. 6257-6270.
- Tavares, R. C., 1995, "Projeto de um Posicionador Submicrométrico para Litografia Óptica", Florianópolis, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- The Mathwork, Inc., 1995, Simulink, for use with MATLAB<sup>TM</sup>.
- Vásquez, J. A. R., 1994, "Desenvolvimento de um Posicionador de Ultraprecisão", Florianópolis, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Watanabe, F. Y., 1992, "Desenvolvimento de um Atuador Hidrostático Diferencial e de um Sensor Optoeletrônico para Posicionamento Linear de Precisão", São Carlos, Tese de Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os responsáveis pelo conteúdo deste artigo.

# ASPECTS OF DESIGN OF A ROTATING TILT STAGE FOR DIMENSIONAL CORRECTION DURING MACHINING HIGH PRECISION

## *Abstract*

*This work deals with a rotating tilt stage. It considers the dimensional correction of aspheric workpieces during high precision machining, in order to obtain nanometric accuracies. It defines the angular micropositioning with the use of piezoelectric actuators. The problem found to energize the actuators, because it is a rotating driving mechanism is discussed. The chosen solution is presented and important points are highlighted, such as: a) to energize through sliding ring collectors, of copper, fastened to the external diameter of the device; b) electric isolation between the rings and the workpiece; c) connection of the coax cable of the piezoelectric actuators; d) to ground the coax cables, just using a sliding ring collector. The transfer of electric current of the control system to the sliding rings and piezoelectric actuators is explained. Contacts with 65% of silver and 35% of carbon, with double springs to guarantee the pressure of the contact, fastened to a rigid base are used. The reliability in the micropositioning of a workpiece depends on the preservation of the electric current of 50mA to the actuators. It is shown that it is possible to maintain relative position between tool and workpiece during high precision machining, using the angular micropositioning of the workpiece, guaranteeing nanometric accuracies.*

*Key words: micropositioning, piezoelectric actuators and high precision*