



# SISTEMA DE CALIBRAÇÃO PARA AVALIAR OS ERROS CINEMÁTICOS E DE ATRASO DO SERVOACIONAMENTO DE TORNOIS CNC ATRAVÉS DE UM LASER INTERFEROMÉTRICO

Heber Ferreira Franco de Castro<sup>1</sup>, Wellington Santos Barros<sup>2</sup>

<sup>1</sup> INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial), Duque de Caxias, Brasil, hfcastro@inmetro.gov.br

<sup>2</sup> INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial), Duque de Caxias, Brasil, wsbarros@inmetro.gov.br

**Resumo:** Este artigo descreve um método, baseado em laser interferométrico, para calibrar os erros cinemáticos e de atraso do servoacionamento de tornos CNC operando no modo de cortar roscas e sem forças de usinagem. O ângulo de rotação do eixo-árvore é medido através de um polígono de precisão, montado no eixo-árvore e de um dispositivo de disparo optoeletrônico. Por outro lado, o laser interferométrico mede o deslocamento do carro longitudinal do torno em relação a um retrorefletor afixado na placa do eixo-árvore. Quando este gira, um trem de pulsos é gerado pelo dispositivo de disparo. Um programa computacional foi desenvolvido para adquirir as medidas de deslocamento do carro e os respectivos pulsos que representam os ângulos de rotação do eixo-árvore. Com esses dados, o programa calcula os erros cinemáticos do torno. Ademais, com este método pode-se determinar o atraso do servo em diferentes velocidades da árvore. Este método é capaz de medir os seguintes componentes dos erros cinemáticos: erro de passo progressivo, erro cíclico e o erro de flutuação axial do eixo-árvore.

**Palavras-chave:** erros cinemáticos, erros de atraso do servoacionamento, laser interferométrico, tornos CNC.

## 1. INTRODUÇÃO

Existe uma demanda no setor metal-mecânico pela melhoria da qualidade dos componentes roscados tais como, parafusos de movimento, medidores de rosca, ferramentas de roscar. Tais componentes são utilizados em máquinas-ferramenta, dispositivos de posicionamento e instrumentos de medição. Ao longo de décadas, as normas técnicas têm reduzido significativamente as tolerâncias de fabricação desses componentes. A exatidão dimensional e geométrica dos elementos roscados depende dos *erros cinemáticos* de tornos e de retificadoras de rosca. Os erros cinemáticos podem ser definidos como sendo o desvio relativo de movimento entre dois eixos da máquina que deveriam apresentar um sincronismo cinemático exato. Como exemplo, pode-se citar o sincronismo do movimento de translação com o de rotação no caso de tornos e retificadoras

de rosca. Em máquinas CNC, esta coordenação cinemática entre os eixos é realizada por meios eletrônicos.

Um simples método de verificar a precisão cinemática das máquinas citadas acima é usinar uma rosca numa amostra de cilindro nas mesmas, e em seguida, avaliar seu erro de passo usando um instrumento de medição de passo. Uma outra técnica é medir, manualmente, o deslocamento linear do carro após girar o eixo-árvore de um certo número de revoluções.

Uma técnica mais elaborada para avaliação dos erros cinemáticos consiste no uso de um laser interferométrico para medir o avanço longitudinal do carro porta-ferramenta de um torno. Um interferômetro linear (elemento estacionário) é fixado na parte traseira do barramento do torno e um retrorefletor (elemento móvel) é montado no posto da ferramenta. Por sua vez, a posição angular do eixo-árvore é medida através de um encoder rotativo [1]. O método concebido por Vanherck et al [2] emprega a configuração anterior com a diferença que o retrorefletor é deslocado radialmente para trás da posição da ferramenta, de modo a permitir a usinagem de uma rosca durante o teste. Portanto, neste método os erros cinemáticos são avaliados com a máquina sujeita a forças de usinagem. Contudo, não atende ao princípio de Abbé.

Este artigo apresenta um método para avaliar a precisão cinemática de tornos no modo de cortar roscas e sem forças de usinagem. Este método utiliza um laser interferométrico para medir o deslocamento longitudinal do carro do torno em relação a um retrorefletor afixado na placa do seu eixo-árvore. O ângulo de rotação do eixo-árvore é medido através de um polígono de precisão, montado na placa do torno, e de um dispositivo de disparo optoeletrônico. Um software foi desenvolvido para adquirir os dados e traçar os gráficos dos erros cinemáticos do torno em função da posição angular da árvore. Este método de calibração permite avaliar os seguintes componentes dos erros cinemáticos do torno: *erro de passo progressivo*, *erro cíclico* e o *erro de flutuação (periódico) axial da árvore*. Além disso, com esta técnica podem-se determinar os erros de atraso do servoacionamento de tornos CNC no modo de usinar roscas. Como é sabido, em tais máquinas, existe um atraso do fuso

de esferas recirculantes do carro longitudinal em relação ao eixo-árvore. Ou seja, o fuso só começa a se mover após o eixo-árvore girar de um certo ângulo. Na usinagem de roscas em tornos CNC, este atraso é relevante, pois uma mudança na velocidade do eixo-árvore fará com que a ponta da ferramenta inicie o corte numa diferente posição da hélice da rosca, resultando em erros na mesma.

## 2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Figura 1 representa quatro sucessivos passos de uma rosca. A hélice da rosca foi “desenrolada” e rebatida em um plano, transformando-se num triângulo reto. Entretanto, a trajetória real da ferramenta de corte (linha tracejada) não tem a forma helicoidal. Tal trajetória assemelha-se a uma onda senoidal. Nesta figura podem ser observados dois tipos de erros encontrados em roscas, a saber: a) *erro de passo progressivo* é causado pelo desvio no ângulo de hélice ‘ $\alpha$ ’ da rosca durante a sua usinagem; b) *erro cíclico* é uma pequena oscilação periódica na trajetória da ferramenta. É causado pela flutuação axial do eixo-árvore ou do fuso de movimento do carro longitudinal do torno. Desalinhamentos nos mancais do eixo-árvore ou do fuso podem induzir tal flutuação.

$p$  : passo nominal  
 $\alpha$  : ângulo de hélice nominal

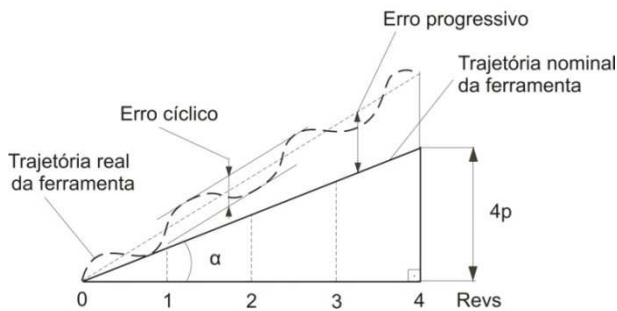


Fig. 1. Erros progressivo e cíclico.

Figura 2 mostra o sistema de medição para avaliar os *erros progressivo e cíclico*, bem como, o *atraso do servoacionamento* de um torno CNC no modo de usinar roscas e sem cargas de usinagem. Tal sistema é constituído dos seguintes componentes: cabeçote do laser, defletor de feixe, interferômetro linear, retrorefletor, polígono de precisão, mandril de suporte, sistema de laser diodo, gerador de pulso, cartão eletrônico do laser, microcomputador e impressora.

O defletor de feixe é montado na contraponta do torno que é estacionária. O interferômetro linear é preso através de uma chapa de aço ao carrossel de ferramentas. O polígono de precisão e o retrorefletor são fixos ao mandril de suporte, que por sua vez, é montado na placa do torno. O laser interferométrico mede o deslocamento do carro longitudinal em relação ao retrorefletor. Assim, este método de medição detecta a flutuação axial do eixo-árvore e do fuso de movimento que aciona o carro longitudinal do torno.

O ângulo de rotação do eixo-árvore é medido pelo polígono operando em conjunção com o sistema de laser

diodo e o gerador de pulso. Estes dois últimos constituem o dispositivo de disparo optoeletrônico mencionado na introdução deste artigo. Um sistema computacional foi desenvolvido para adquirir as medidas do deslocamento do carro, bem como, os pulsos que representam o ângulo de rotação do eixo-árvore. De posse desses, o programa calcula os erros progressivo e cíclico do torno no modo de usinar roscas em função da posição angular da árvore.

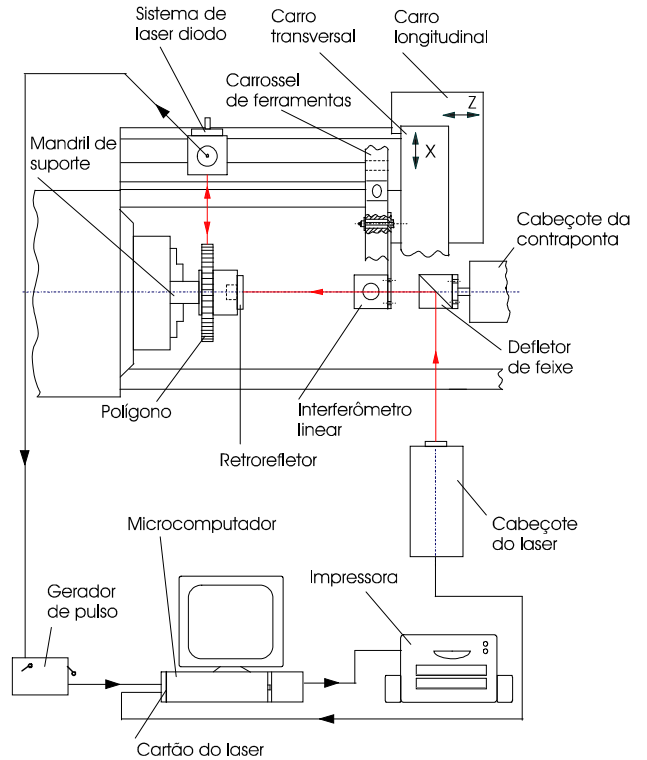


Fig. 2. Sistema de medição para avaliar os erros cinemáticos e de atraso do servoacionamento de um torno CNC.

Os erros progressivo e cíclico são determinados conforme descrito abaixo:

Nesta análise,  $F$  denota o número de faces do polígono e  $Rd$  o número de revoluções que se deseja avaliar. Suponhamos que um polígono de 12 lados seja usado e se deseja adquirir dados de 4 revoluções como representado na Fig. 1. Então,  $F = 12$  e  $Rd = 4$ . O *avanço nominal da ferramenta* (hélice ideal) em função da posição angular é dado por

$$T_N = p(I/F) \quad (1)$$

onde,  $p$  é o passo nominal da rosca e  $I$  o índice da face do polígono. O termo  $(I/F)$  é a posição angular dada em revs (número de revoluções). Por exemplo,  $I = 0$  (1ª. face do polígono),  $I/F = 0$  rev;  $I = 1$  (2ª. face do polígono),  $I/F = 1/12$  rev;  $I = 12$  (1ª. face do polígono após uma volta),  $I/F = 1$  rev;  $I = 48$  (1ª. face do polígono após 4 voltas),  $I/F = 4$  revs.

Na Fig. 2, toda vez que uma face do polígono torna-se perpendicular ao feixe de luz do sistema de laser diodo, um pulso é gerado. Este pulso dispara uma medida do laser interferométrico. Para ter a primeira face do polígono como referência zero para o início da rosca, a primeira indicação

do laser é subtraída de todas as outras. Agora, as indicações do laser representam o *avanço real da ferramenta* ( $T_A$ ) sobre a rosca. Assim, os erros progressivo e cíclico são calculados por

$$E_{PY} = T_A - p(I/F) \quad (2)$$

Baseado nesta equação pode-se fazer um gráfico dos erros progressivo e cíclico em função do número de revoluções (revs).

Os *erros de atraso do servoacionamento* são os erros progressivo e cíclico obtidos com o eixo-árvore girando em diferentes velocidades de rotação em cada viagem do carro. Como sabido da prática, quanto mais veloz a árvore gira, maior é o atraso do fuso de movimento. Comparando-se a curva de erros progressivo e cíclico de várias viagens do carro em diferentes velocidades de rotação da árvore, pode-se obter o valor do atraso do servoacionamento numa certa velocidade de rotação em relação a uma de referência.

O atraso do servoacionamento pode ser avaliado em dois regimes de trabalho, a saber: a) *regime permanente*; b) *regime transiente*. No primeiro, antes de se iniciar aquisição de dados, o carro é movido de uma certa distância para se alcançar o regime permanente com velocidade constante. Em geral, três viagens são realizadas em três diferentes velocidades de rotação da árvore, no modo de cortar roscas e com o mesmo passo nominal. No segundo regime, o processo de aquisição de dados começa quando o carro move-se do repouso e o feixe de luz do sistema de laser diodo incide na primeira face do polígono. Cada viagem, inicia-se no mesmo ponto sobre o barramento do torno e com o mesmo passo nominal. São, também, realizadas 3 viagens com diferentes velocidades de rotação.

O software desenvolvido apresenta os resultados na forma gráfica conforme a norma ISO 230-2 [3]. Não obstante esta norma seja aplicada na avaliação da precisão de posicionamento de eixos comandados numericamente, ela pode ser empregada no caso da precisão cinemática. As posições alvos (nominais) no teste de posicionamento são agora definidas pelos lados do polígono quando eles giram durante o deslocamento do carro.

O método proposto neste trabalho apresenta vantagens em relação aos descritos nas referências [1, 2] que são abordadas a seguir:

a) O ângulo de rotação medido através do polígono é insensível aos erros de centragem do mesmo em relação ao eixo de rotação da árvore. O movimento de batida axial e radial do eixo-árvore não afeta a precisão do trem de pulsos gerado pelo dispositivo de disparo. Nos sistemas de medições descritos nas referências [1, 2], defeitos de montagem do encoder rotativo tendem a gerar erros periódicos. Além disso, as batidas axial e radial do eixo-árvore podem afetar a precisão do trem de pulsos produzido pelo encoder;

b) O polígono de precisão em conjunção com o dispositivo de disparo gera pulsos precisamente espaçados. Cada pulso representa uma posição angular exata do eixo-árvore. A repetitividade unidirecional deste dispositivo é de  $\pm 0,2$  arco de segundo, sendo assim bastante satisfatória para a presente aplicação;

c) Na prática existe um pequeno erro angular entre os lados adjacentes do polígono de precisão. Esses erros são medidos com instrumentação apropriada e introduzidos no software do sistema para sua compensação;

d) O sistema de laser diodo consiste de uma fotocélula de quatro quadrantes, um tubo de laser diodo, um divisor de feixe, montados num pequeno bloco de aço. Este sistema é compacto, fácil de instalar e alinhar na máquina;

e) A localização dos componentes ópticos difere dos métodos das referências [1, 2]. No método proposto aqui, o retrorefletor é montado no eixo-árvore e o interferômetro linear no posto da ferramenta. Isto visa detectar a flutuação axial do eixo-árvore bem como do fuso de movimento do carro longitudinal. Esses movimentos periódicos contribuem para os erros nos componentes roscados. Os outros métodos citados nas referências [1, 2] não detectam a flutuação axial do eixo-árvore;

f) O atraso do servoacionamento de tornos CNC pode ser monitorado ao longo de sua vida útil. Este atraso pode afetar a exatidão dimensional e de forma dos componentes roscados fabricados no torno, em caso de haver variação da velocidade do eixo-árvore durante a usinagem da rosca.

### 3. APLICAÇÃO DO CALIBRADOR DE ERROS CINEMÁTICOS E DE ATRASO DO SERVOACIONAMENTO NUM TORNO CNC

O sistema de calibração proposto foi utilizado para avaliar a precisão cinemática e o atraso do servoacionamento de um torno CNC modelo MHP Moog-Turn 50. Este apresenta as seguintes especificações técnicas: a) comando numérico OpenCNC v. 4.0 produzido por MDSI; b) altura de centro sobre o barramento de 450 mm; c) curso longitudinal do carro (eixo 'Z') de 550 mm; d) potência do servomotor CC do eixo-árvore de 18 kW.

Nos testes foi utilizado o laser interferométrico 5529A da Agilent Technologies. Ele é capaz de realizar medidas dinâmicas, sendo assim adequado para esta aplicação.

#### 3.1. Medição dos Erros Cinemáticos

Os erros progressivo e cíclico foram medidos no modo unidirecional com o eixo-árvore girando a 120 rpm. Um polígono de precisão de 12 lados foi utilizado nos testes. O torno operou no modo de usinar roscas com passo nominal de 2 mm. Antes de iniciar a gravação das 80 revoluções do eixo-árvore, o carro teve uma pré-corrida de 25 mm para que a máquina entrasse em regime permanente. Portanto, o comprimento nominal da viagem foi de 160 mm. A figura 3 mostra os gráficos dos erros progressivo e cíclico médios e da repetitividade  $\pm 2s$  referente às 5 viagens unidirecionais do carro. O "s" é a incerteza padrão dos desvios de posição obtidos pelas 5 viagens numa posição nominal ("estimator of the unidirectional standard uncertainty of positioning at a position") [3]. Os parâmetros da norma ISO 230-2 [3] estão descritos no quadro superior da figura 3. Os gráficos dessa figura indicam que este torno apresenta grandes erros de passo progressivo e baixa repetitividade no modo de usinar roscas.

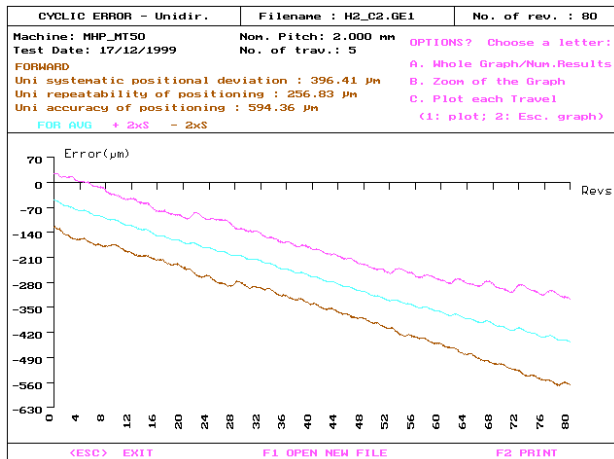


Fig. 3. Gráficos dos erros progressivo e cíclico médios e  $\pm 2s$  avaliados em 5 viagens de ida do carro do torno CNC.

### 3.2. Medição do Atraso do Servoacionamento

Os erros de atraso do servo foram medidos no modo unidirecional com o eixo-árvore girando em 3 velocidades, a saber: 70, 100 e 120 rpm. Foi utilizado um polígono de precisão de 12 lados nos testes. O torno operou no modo de usinar roscas com passo nominal de 5 mm. Foram adquiridas 24 revoluções do eixo-árvore, resultando numa corrida de comprimento nominal de 120 mm. Para medir o atraso do servo em regime permanente, o carro teve uma pré-corrida de 35 mm antes de iniciar a gravação das 24 revoluções da árvore. Na 1ª. corrida, o eixo-árvore girou a 70 rpm. Após o retorno do carro à posição -35 mm (coordenada do laser interferométrico), a 2ª. corrida foi realizada com velocidade de 100 rpm. Este procedimento repetiu-se para a 3ª. velocidade de 120 rpm.

A figura 4 mostra os gráficos dos erros de atraso do servo do torno MT 50 em regime permanente. Existem duas anormalidades nestes gráficos. Primeiro, os valores dos erros progressivos são imensos. Segundo, a curva de erros na velocidade de 120 rpm cruza as outras duas curvas. O comportamento normal seria que tal curva ficasse abaixo das outras seguindo aproximadamente a mesma declividade. Isto porque quanto mais rápido a velocidade da árvore, maior é o atraso do fuso.

O *atraso relativo do servo* é definido pela diferença entre as curvas de erros na posição angular  $revs = 0$ . Portanto, baseado nos gráficos da figura 4, os atrasos do servo em 100 rpm e 120 rpm relativos à referência de 70 rpm, são respectivamente, cerca de 0,030 mm e 0,090 mm.

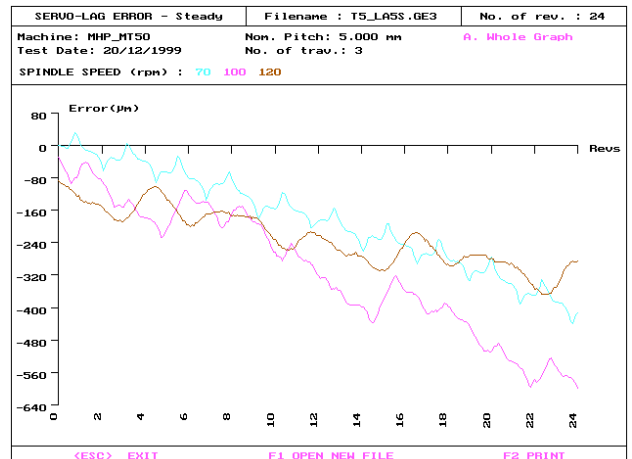


Fig. 4. Atraso do servoacionamento do torno MT 50 em regime permanente.

A figura 5 representa os gráficos dos erros de atraso do servo do torno MT 50 em regime transiente. Para esta situação tem-se o *atraso absoluto do servo* definido pelo valor médio do erro no segmento horizontal da curva. Dois problemas são observados em tais gráficos. Primeiro, os erros de atraso são enormes. Segundo, o valor do atraso em 120 rpm é menor do que em 70 e 100 rpm. O comportamento normal seria ter o atraso de 120 rpm abaixo da curva de 100 rpm. Como os resultados se mostraram tão imprevisíveis, não foi considerado relevante determinar o atraso absoluto do servo nas diferentes velocidades do teste.

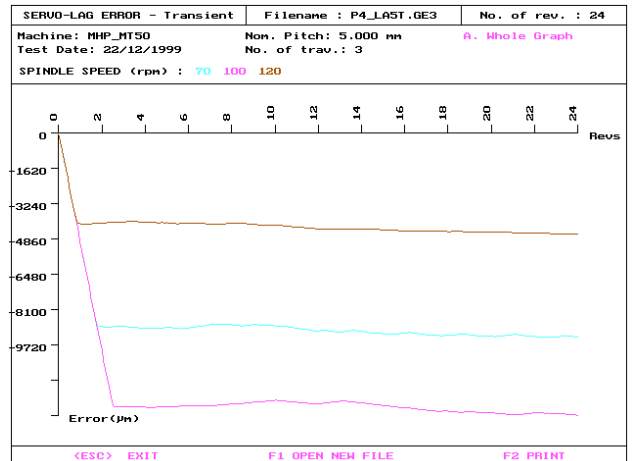


Fig. 5. Atraso do servoacionamento do torno MT 50 em regime transiente.

Como já visto das figuras 3, 4 e 5, o desempenho do torno MT 50, no tocante aos erros progressivos, repetitividade e atraso do servo é totalmente insatisfatório no modo de usinar roscas. Esta máquina sofreu "retrofitting" um pouco antes desses testes. Um novo comando numérico da MDSI tinha sido instalado na mesma. Verificou-se que este comando e seu software não estavam ajustados ao antigo hardware da máquina. Assim, era evidente que o sistema de controle precisava de ajuste. Isto foi executado, posteriormente, pela assistência técnica do fabricante do comando numérico.

A seguir, são apresentadas algumas razões para se avaliar o atraso do servo:

a) Em regime permanente, permite-se quantificar o atraso relativo do servo de uma velocidade do eixo-árvore em relação a uma de referência. Com isto, pode-se estimar se ocorrerão defeitos inaceitáveis na rosca, havendo variação na velocidade de referência durante a usinagem;

b) No teste em regime transiente, pode-se observar se existe alguma velocidade comumente usada em que o atraso absoluto do servo esteja fora da normalidade;

c) Esta técnica pode ser utilizada para monitorar, periodicamente, o atraso do servo de tornos CNC. Assim, ao se adquirir uma máquina nova, faz-se testes de atraso do servo em várias velocidades de operação. Após um ano, esses testes são repetidos nas mesmas condições de funcionamento, de modo que se possa comparar com os valores originais de fábrica. Caso exista alguma discrepância inaceitável, o comando da máquina deverá sofrer ajuste.

Este sistema de calibração corrige, via software, o comprimento de onda do laser interferométrico em função das condições atmosféricas, como também, a expansão (ou contração) térmica da máquina. Portanto, antes de iniciar o teste o usuário deve entrar no software, via teclado, com os valores de pressão, temperatura e umidade relativa do ar, bem como, a temperatura da máquina.

#### 4. CONCLUSÕES

1) Foi desenvolvido um sistema de medição para avaliar os erros cinemáticos e o atraso do servoacionamento de tornos CNC no modo de usinar roscas e sem forças de usinagem. Neste método, um laser interferométrico mede o avanço do carro longitudinal da máquina. Um polígono de precisão montado no eixo-árvore em conjunção com um dispositivo de disparo optoeletrônico mede a posição angular da árvore. Com os dados do deslocamento do carro e do correspondente ângulo de rotação do eixo-árvore podem-se obter os erros cinemáticos ou o atraso do servo em diferentes velocidades da árvore. Este atraso pode ser avaliado em regime permanente ou transiente.

2) Este sistema é capaz de avaliar os seguintes componentes dos erros cinemáticos de tornos mecânicos: erros de passo progressivo, erro cíclico e erro periódico do eixo-árvore;

3) Este método pode ser utilizado para monitorar o atraso do servo de tornos CNC ao longo de sua vida útil. Caso haja variação nos valores originais de fábrica, tal atraso será ajustado manualmente no comando numérico da máquina.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. J. Hocken, “Dynamic Machine Tool Errors”, *Report: Technology of Machine Tools – Machine Tool Accuracy*, V. 5, Lawrence Livermore Laboratory, California, pp. 38-52, 1980.
- [2] P. Vanherck, K. Bagiasna, J. Peters, “Continuous Measurement of Linear Motion Errors in Single Tool Cutting”, *Proc. of the 19th MTDR Conference*, pp. 375-381, 1978.
- [3] ISO 230-2, 1997, “Test Code for Machine Tools – Part 2: Determination of Accuracy and Repeatability of Positioning of