

# METROLOGIA DINÂMICA DE MÁQUINAS-FERRAMENTA USANDO UM LASER INTERFEROMÉTRICO: MEDIÇÃO DE ERROS DE ROTAÇÃO DE EIXOS-ÁRVORE E DE ERROS CINEMÁTICOS

**Heber Ferreira Franco de Castro**

Rua Giulio Romano, 141 - Apto 84 - Vila Nova Alba - São Paulo - SP - CEP: 05358-090

E-mail: heber301@yahoo.com.br

**Resumo.** *Este artigo apresenta duas aplicações do laser interferométrico da Hewlett Packard 5529A (Agilent Technologies) na metrologia dinâmica de máquinas-ferramenta. Na primeira aplicação é apresentado um método para aferir os erros de rotação radial e axial, bem como os "drifts" (deslocamentos) térmicos radial e axial de eixos-árvore. O princípio de medição é similar à configuração que utiliza um interferômetro linear para a aferição de deslocamento linear. Contudo, em vez do retrorefletor é usada uma esfera padrão que tem excelente acabamento superficial e alta exatidão de circularidade. Uma lente convergente é empregada para focar o feixe de laser num pequeno ponto na superfície da esfera. Esta esfera é fixa na extremidade de um mandril que, por sua vez, é montado na placa do eixo-árvore. A segunda aplicação trata de um método para avaliar, dinamicamente, a precisão cinemática de tornos e retificadoras de roscas 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 óptico-eletrônico. O laser interferométrico mede o deslocamento do carro longitudinal em relação a um retrorefletor afixado na placa do eixo-árvore. Quando este gira, um trem de pulsos é gerado pelo dispositivo de disparo. Estes pulsos são transmitidos para o cartão do laser a fim de comandar as medições efetuadas pelo laser interferométrico. Foram realizadas aplicações dos calibradores de erros de rotação e de erros cinemáticos, respectivamente, num centro de usinagem e num torno CNC.*

**Palavras-chave:** *erros de rotação; erros cinemáticos; laser interferométrico.*

## 1. INTRODUÇÃO

Um importante subsistema de uma máquina-ferramenta é o seu eixo-árvore. Como é sabido, os erros de rotação de eixos-árvore causam degradação no acabamento superficial e na circularidade da peça usinada. Além disso, produzem desvios dimensionais e de localização nos elementos geométricos presentes na peça. A análise dos erros de rotação pode ser utilizada para prever a qualidade da peça a ser produzida pela máquina, qualificar a mesma antes do início do processo de produção e por fim, fornecer uma guia para a compra e manutenção da máquina.

Existem dois tipos básicos de erros de rotação de eixo-árvore, a saber: a) *erros do eixo de rotação* ("axis of rotation errors"); b) *"drift" térmico* ("spindle thermal drift"). Os erros do tipo "a" são constituídos de duas componentes do erro radial, uma do erro axial e duas componentes do erro angular. Para o tipo "b", têm-se o "drift" térmico axial, o radial e o angular. Na verdade, essas componentes dos erros de rotação são originadas dos cinco graus de liberdade indesejáveis do eixo-árvore.

A seguir, é apresentada uma breve descrição de alguns recentes trabalhos que abordam a medição de erros de rotação de eixos-árvore:

O método de multi-pontos utiliza nove transdutores capacitivos para aferir simultaneamente os erros radial, axial e angular do eixo-árvore. Um cilindro padrão é empregado como referência metrológica<sup>(1)</sup>.

Uma técnica óptica de Moiré foi adotada para medir o erro radial de um eixo-árvore sem o uso de uma peça padrão. As franjas de Moiré geradas pela interferência óptica entre dois círculos concêntricos são detectadas por uma câmera CCD. Um círculo concêntrico é montado na ponta do eixo-árvore e o outro, que é o de referência, é mantido estacionário<sup>(2)</sup>.

Um sistema de medição baseado num interferômetro "Fizeau" foi desenvolvido para aferir o erro axial e o angular de um eixo-árvore de ultraprecisão<sup>(3)</sup>.

Neste trabalho de pesquisa, os erros de rotação de eixos-árvore são aferidos usando um laser interferométrico. Este método é capaz de medir os erros radial e axial, bem como, os "drifts" térmicos radial e axial de eixos-árvore. As medições são realizadas pela reflexão do feixe de laser diretamente através da superfície de uma esfera padrão. Essa esfera apresenta excelente acabamento superficial e alta exatidão de circularidade. A superfície da esfera é usada como refletor óptico. Uma lente convergente é empregada para focar o feixe de laser num ponto na superfície da esfera. Isto é feito para se evitar grande perda de energia devido à reflexão do feixe numa superfície esférica.

A precisão de componentes rosqueados 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.

Uma técnica clássica<sup>(4)</sup> para aferição 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. A posição angular do eixo-árvore é medida por um encoder rotativo. O método de Vanherck<sup>(5)</sup> emprega o mesmo sistema de medição anterior<sup>(4)</sup>, a única diferença é 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, o sistema de Vanherck<sup>(5)</sup> mede os erros cinemáticos com a máquina sujeita a forças de usinagem.

Este artigo também apresenta um método para avaliar, dinamicamente, a precisão cinemática de tornos e de retificadoras de rosca quando operando 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 sua placa rotativa. 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 óptico-eletrônico. Este dispositivo é composto de um sistema de laser diodo e de um gerador de pulso. Quando o eixo-árvore gira, a reflexão do feixe do laser diodo em cada lado do polígono, faz com que o dispositivo de disparo produza um trem de pulsos que é enviado para o cartão eletrônico do laser. Como o polígono apresenta um ângulo constante entre os seus lados, a posição angular do eixo-árvore é determinada por meio da contagem do número de pulsos no microcomputador via software. Para cada pulso, o laser interferométrico faz uma medição do deslocamento do carro do torno.

## **2. SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA AFERIR OS ERROS DE ROTAÇÃO DE EIXOS-ÁRVORE DE MÁQUINAS-FERRAMENTA**

Na pesquisa descrita neste artigo foi empregado o laser interferométrico da Hewlett Packard 5529A (atualmente, "Agilent Technologies").

A figura 1 apresenta o sistema de medição para aferir o erro radial e o "drift" térmico radial num torno. Ele compreende dos seguintes componentes: cabeçote do laser, interferômetro linear, retrorefletor, lente convergente, suporte da lente, dispositivo de avanço por parafuso, esfera padrão, espelho plano, mandril com ajuste angular, sistema de laser diodo, gerador de pulso, cartão eletrônico do laser, microcomputador e impressora.

O princípio desse método é transferir o erro de rotação do eixo-árvore para uma esfera padrão que opera como um retrorefletor. A esfera é afixada na extremidade do mandril que é montado na placa do eixo-árvore. O laser interferométrico mede a batida radial do eixo-árvore. Esta contém o erro de circularidade da esfera padrão, o erro radial do eixo-árvore e a excentricidade da esfera. O mandril possui um mecanismo que permite ajuste angular do eixo de revolução da esfera. Desse modo, é possível reduzir o erro de centragem da esfera, minimizando assim a componente da excentricidade da batida radial.

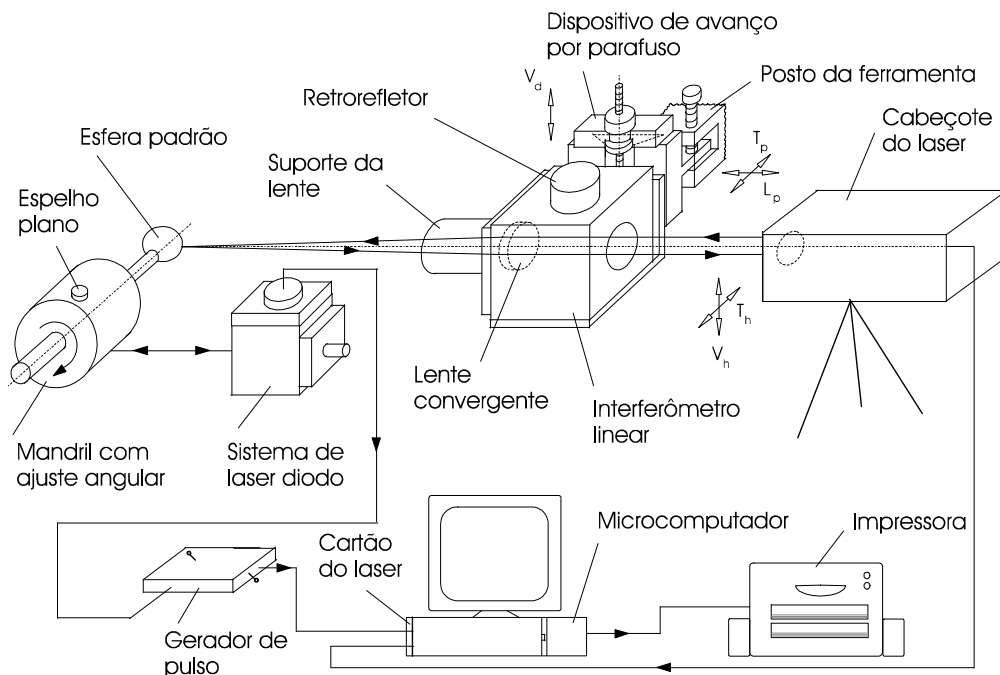


Figura 1. Sistema de medição para aferir o erro radial e "drift" radial do eixo-árvore de um torno.

O laser interferométrico adquire a batida radial durante um número consecutivo de revoluções da árvore. Este número é escolhido pelo usuário no programa de aquisição de dados. As medidas da batida radial são armazenadas na memória do computador. Em seguida, tais medidas são interpoladas e salvas num arquivo de dados no disco rígido do computador. O número de dados por revolução (rev) que se deseja, pode ser selecionado no software do sistema.

Com o objetivo de iniciar e terminar o processo de coleta de dados num mesmo ponto é necessário detectar precisamente uma revolução da árvore. Para este fim, é utilizado o dispositivo de disparo mencionado na seção 1. Como já foi dito, ele é constituído de dois elementos, a saber: a) sistema de laser diodo; b) gerador de pulso. O primeiro elemento produz uma par de sinal analógico a partir de uma fotocélula de quatro quadrantes. O segundo converte os sinais analógicos num pulso quadrado estreito. Este pulso é transmitido para o cartão eletrônico do laser a fim de iniciar o processo de aquisição de dados e contar o número de revoluções da árvore através do software.

Para se conseguir o alinhamento do laser, os seguintes movimentos manuais de ajuste são fornecidos: vertical ( $V_h$ ) e transversal ( $T_h$ ) do cabeçote do laser; longitudinal ( $L_p$ ) e transversal ( $T_p$ ) do carro do torno; vertical ( $V_d$ ) do dispositivo de avanço por parafuso. Desse modo, é possível obter um alinhamento do laser maior que 90% de reflexão.

O procedimento para obter o "drift" térmico radial do eixo-árvore em função do tempo é descrito abaixo:

Inicialmente, a máquina antes do teste deve estar em "estado frio", ou seja, na temperatura ambiente. Quando o teste começa, o computador adquire, no instante  $t = 0$ , a batida radial da árvore durante um certo número de revoluções e armazena os dados num arquivo com nome da extensão '.S01'. De agora em diante, este processo é repetido periodicamente num certo intervalo de tempo. Vamos supor que tal intervalo seja 20 minutos. Então, em  $t = 20$  min., o segundo arquivo "drift" com extensão '.S02' é coletado. Em  $t = 40$  min., o terceiro arquivo '.S03' é adquirido. Esta rotina continua até alcançar o número de arquivos "drifts" que se deseja coletar. Ambos, o intervalo de tempo e o número de arquivos "drifts" requeridos são definidos pelo usuário no programa de aquisição de dados. O "drift" térmico radial é calculado através do processamento dos raios dos círculos dos mínimos quadrados de cada arquivo "drift" '.SXX' que contém os valores da batida radial do eixo-árvore.

O número de dados efetivamente coletados em cada revolução pode variar em virtude da alteração da velocidade de rotação do eixo-árvore. Para plotar os erros de rotação em função da posição angular da árvore, este número deve ser o mesmo para cada revolução. Para conseguir isso, é empregado a técnica de interpolação linear.

Neste sistema de medição é utilizada uma esfera padrão como referência metrológica. Embora essa esfera tenha alta exatidão de circularidade, para a medição de erros radiais de eixo-árvore de ultraprecisão pode ser necessário separar tais erros de circularidade dos erros radiais do eixo-árvore. Os erros de circularidade da esfera são determinados por uma máquina de medição de circularidade de altíssima precisão. Em seguida, esses erros são introduzidos no software pelo usuário e são armazenados num arquivo com extensão '.BME'. O programa de aquisição de dados subtrai estes erros de circularidade dos valores interpolados da batida radial. O resultado desta operação é armazenado no disco rígido do computador.

Como já mencionado no início desta seção, as medidas da batida radial contêm a excentricidade da esfera padrão. Assim, antes de apresentar os erros radiais do eixo-árvore na forma gráfica, o erro de centragem da esfera é removido dos valores da batida radial. Isto é feito através do método dos mínimos quadrados. O software mostra na tela do computador, os gráficos polares do erro radial ("radial error motion polar plots") e seus respectivos erros globais ("error band") em relação ao centro do círculo dos mínimos quadrados.

A figura 2 mostra o sistema de medição descrito acima aplicado no caso de aferição do erro axial e do "drift" axial num torno. Nesta configuração, o retrorefletor é alinhado com o cabeçote do laser. O programa de aquisição de dados é o mesmo que o do caso do erro radial. A batida axial do eixo-árvore consiste de duas componentes: a) erro axial fundamental; b) erro axial. Através do método dos mínimos quadrados, o erro axial fundamental é removido das medidas da batida axial. O software apresenta o erro axial em gráficos polares cuja origem é o centro do círculo dos mínimos quadrados.

O método de medição proposto neste artigo apresenta as seguintes vantagens:

a) Permite a medição dos erros de rotação radial e axial bem como dos "drifts" térmicos radial e axial de eixos-árvore;

b) Os erros de rotação são medidos com alta precisão devido à alta resolução, repetitividade e exatidão do laser interferométrico. Nesta aplicação, o laser 5529A da HP tem resolução de 1 nm;

c) O laser 5529A tem frequência de aquisição de dados de até 2,5 MHz. Isto é fornecido através do circuito eletrônico TBG ("Time Base Generator") presente no cartão do laser. Desse modo, um bom quadro dos erros de rotação podem ser obtidos mesmo em altas velocidades de rotação;

d) Lasers não interagem com o objeto sob teste, e portanto não produzem ruídos na medição.

O método citado na referência<sup>(1)</sup> utiliza transdutores capacitivos que interagem com o objeto sob teste, produzindo ruídos na medição. Por exemplo, em eixos-árvore que giram em altas velocidades, uma corrente de ar originada nas proximidades do transdutor causa ruídos no sistema de medição. A técnica de Moiré<sup>(2)</sup>, além de ser complexa, permite aferir somente o erro radial. O método que usa o interferômetro "Fizeau" é também complexo e de custo elevado.

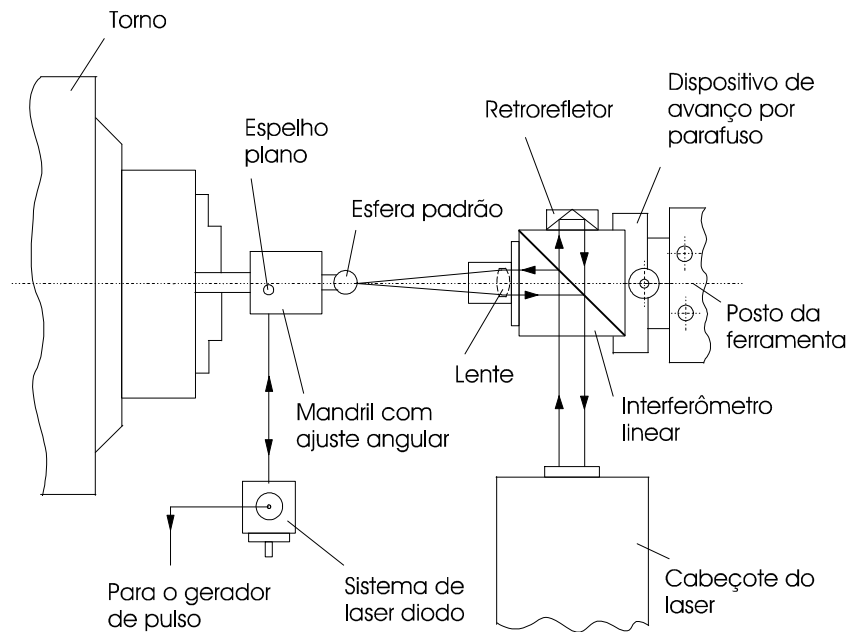


Figura 2. Sistema de medição para aferir o erro axial e o "drift" axial do eixo-árvore de um torno.

### 3. APLICAÇÃO DO CALIBRADOR DE ERROS DE ROTAÇÃO DE EIXOS-ÁRVORE NUM CENTRO DE USINAGEM CNC

O centro de usinagem testado apresenta as seguintes especificações técnicas:

Tipo : Takisawa Mac-V3 de 3 eixos com eixo-árvore vertical;

Curso (mm) : 510 x 400 x 360 (longitudinal da mesa x lateral da mesa x vertical do eixo-árvore);

Sistema de controle : FANUC System 6MB Series;

Eixo-árvore : diâmetro = 55 mm, motor de 7,5 Horsepower, faixa de velocidade 60 - 6000 rpm

#### 3.1 Teste para Aferir o Erro Radial

Foi usada uma esfera padrão de carboneto de tungstênio com diâmetro nominal de 12,000 mm, rugosidade superficial  $R_a = 7$  nm (desvio médio aritmético) e erro global de circularidade de  $0.1 \mu\text{m}$ .

No teste, o cabeçote do laser foi alinhado com o eixo "x" da máquina. O eixo-árvore foi rotacionado numa velocidade de 1000 rpm.

As medidas da batida radial foram coletadas em 5 revoluções consecutivas numa taxa de aquisição de 500 dados/rev. O erro radial total do eixo-árvore do centro de usinagem é mostrado no gráfico da figura 3.

#### 3.2 Teste para Aferir o "Drift" Térmico Axial

Este experimento foi realizado com o eixo-árvore girando durante 5 horas com velocidade de 4500 rpm, partindo do "estado frio" (temperatura ambiente). O erro axial foi armazenado a cada 30 minutos, resultando em 11 arquivos "drifts" (T\_XD4500.S01-S11). O "drift" axial do eixo-árvore do Takisawa está representado no gráfico da figura 4. Observe neste gráfico que após 3,5 horas de operação, a árvore da máquina alcançou a estabilidade térmica. A máxima expansão axial do eixo-árvore foi de  $55 \mu\text{m}$ .

Para finalizar, nos testes para aferir o erro radial e axial, a compensação das variações do comprimento de onda do laser em função das condições atmosféricas não é implementada no software. Isto se deve ao fato de que como as medidas (erros de rotação) efetuadas pelo laser interferométrico são tão pequenas ( $< 100 \mu\text{m}$ ), o valor a ser compensado devido à mudança no

comprimento de onda do laser no ar seria insignificante. Entretanto, nos testes do "drift" térmico, os parâmetros atmosféricos, i.e temperatura, pressão e umidade relativa do ar são monitorados. Estes parâmetros são introduzidos no software, via teclado, durante o teste sempre que houver mudança nas condições atmosféricas. Isto visa compensar pelo erro de "deadpath" do laser interferométrico. Contudo, esta correção é desnecessária nos testes de curta duração como no caso da aferição do erro radial e axial.

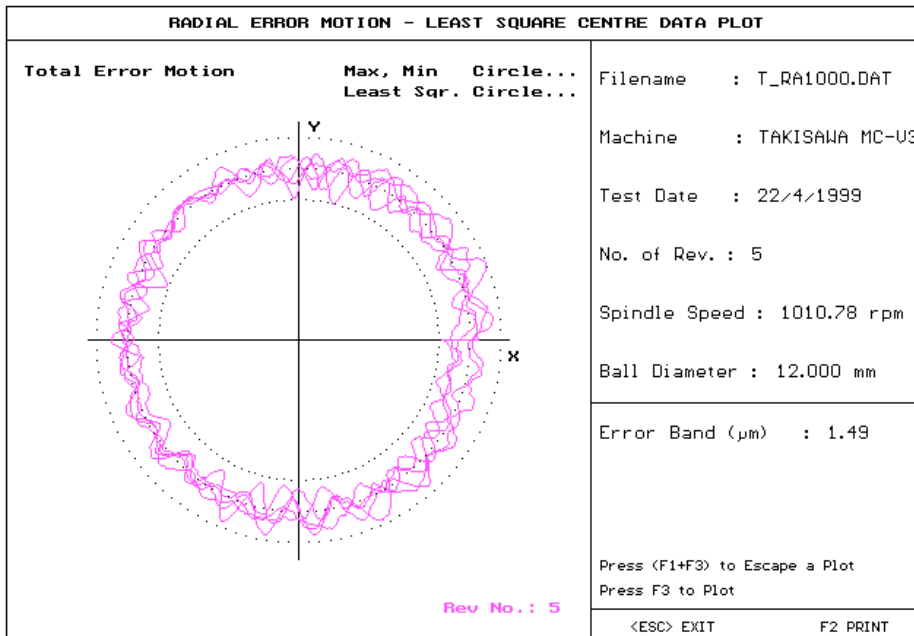


Figura 3. Gráfico polar do erro radial total do eixo-árvore do centro de usinagem Takisawa. Excentricidade da esfera padrão: X = 0,6511 μm, Y = 2,4731 μm.

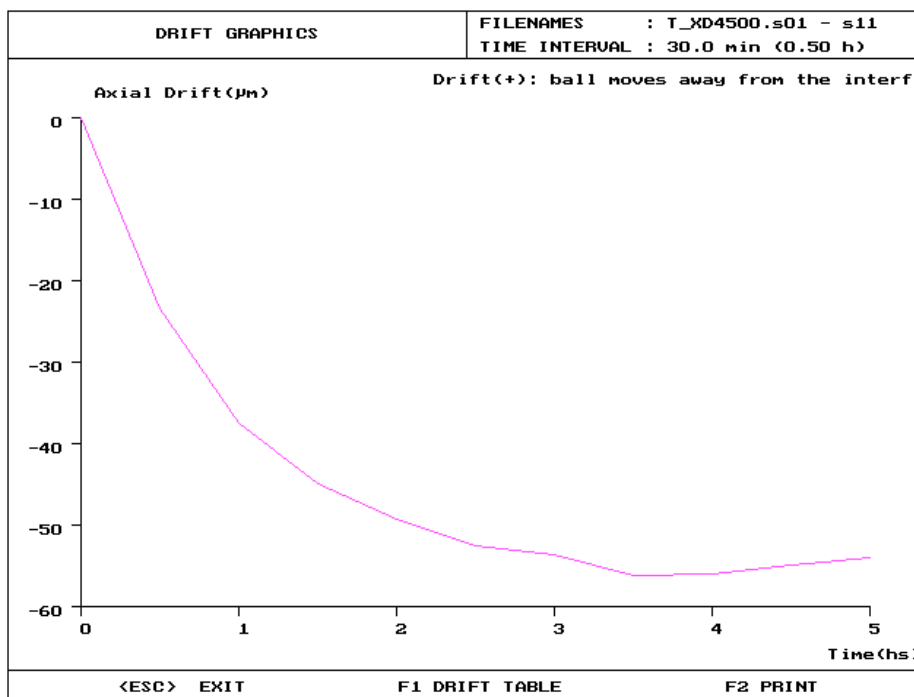


Figura 4. "Drift" térmico axial do eixo-árvore do Takisawa na velocidade de 4500 rpm.

#### 4. SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA AFERIR OS ERROS CINEMÁTICOS DE UM TORNO CNC

A figura 5 mostra o leiaute do sistema de medição utilizado para aferir os erros cinemáticos de um torno CNC no modo de cortar roscas e sem cargas de usinagem. O 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 bem como 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 o movimento periódico axial do eixo-árvore bem como 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. 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 cinemáticos do torno no modo de usinar roscas em função da posição angular da árvore.

Este sistema de calibração é capaz de aferir as seguintes componentes dos erros cinemáticos: *erro de passo progressivo*, *erro cíclico* e o *erro de flutuação (periódico) axial da árvore*. Esta técnica presta-se também para aferir o *atraso do servo-acionamento* ("servo drive lag") de máquinas CNC operando no modo de usinar roscas.

Na prática existe um pequeno erro angular entre os lados adjacentes do polígono de precisão. Esses erros são compensados no software do sistema. Para isso, o usuário deve introduzir, via teclado, os erros do polígono no programa de aquisição de dados.

Para se fazer uma análise estatística dos dados coletados no teste da máquina, são realizadas 5 viagens do carro do torno. Ao final do teste, o software calcula os erros progressivo e cíclico médios e salva o resultado num arquivo de dados.

O teste pode ser realizado no modo unidirecional ou no bidirecional. No primeiro caso, os dados são coletados somente na ida do carro, quando o mesmo se aproxima do eixo-árvore. No segundo caso, os dados são adquiridos tanto na ida como na volta do carro.

O software desenvolvido apresenta os resultados na forma gráfica de acordo com a norma ISO 230-2<sup>(6)</sup>. Não obstante esta norma ser 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.

A repetitividade unidirecional do dispositivo de disparo óptico-eletrônico é de  $\pm 0.2$  arco de segundo. Este valor é considerado bastante satisfatório para a presente aplicação.

Este método proposto aqui apresenta algumas vantagens em relação aos descritos nas referências<sup>(4,5)</sup>. Isto é abordado 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<sup>(4,5)</sup>, 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) A localização dos componentes ópticos difere dos métodos das referências<sup>(4,5)</sup>. 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 do carro. Esses

movimentos periódicos contribuem para os erros nos componentes rosqueados. Os outros métodos citados nas referências<sup>(4,5)</sup> não detectam a flutuação axial do eixo-árvore.

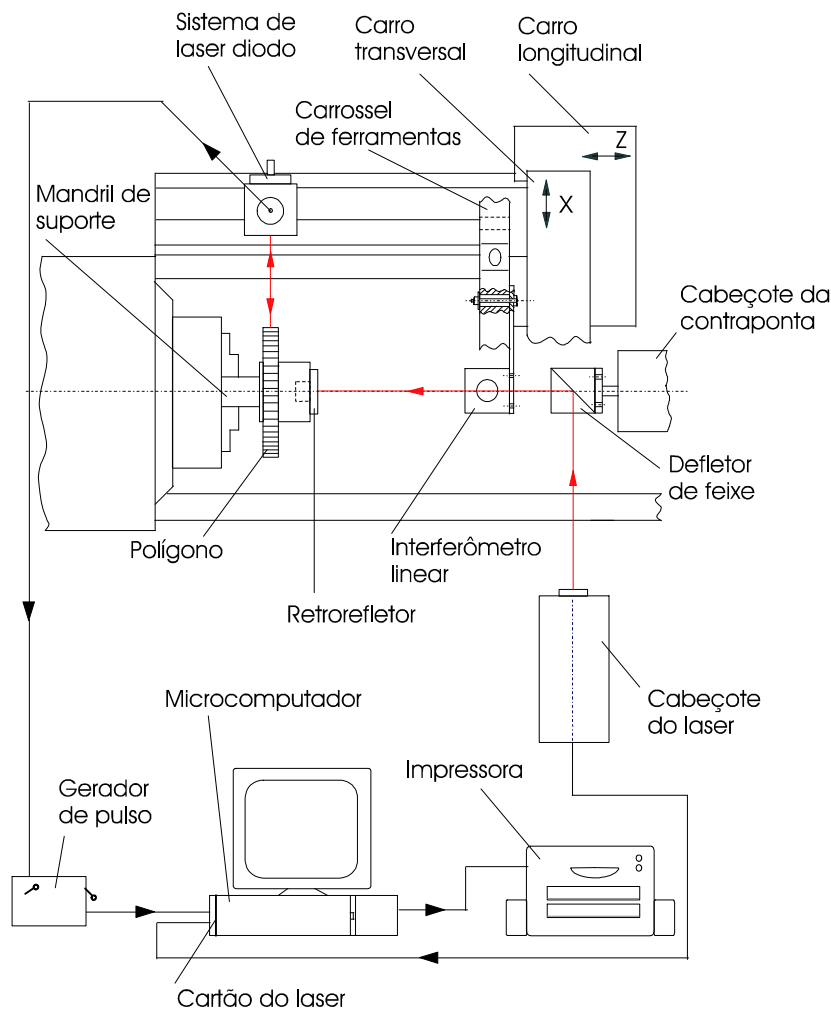


Figura 5. Sistema de medição para aferir os erros cinemáticos de um torno CNC.

## 5. APLICAÇÃO DO CALIBRADOR DE ERROS CINEMÁTICOS NUM TORNO CNC

O torno CNC testado tem as seguintes especificações técnicas:

Modelo : MHP Moog-Turn 50 CNC;

Altura de centro sobre o barramento : 450 mm;

Curso longitudinal do carro (eixo "Z") : 550 mm;

Potência do servomotor CC do eixo-árvore : 18 kW.

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 estava operando no modo de usinar roscas com passo nominal de 2 mm. Antes de iniciar a gravação das 80 revoluções da árvore, o carro teve uma pré-corrida de 25 mm, para que a máquina entrasse em regime permanente. A figura 6 mostra o gráfico dos erros progressivo e cíclico médios e os gráficos 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"<sup>(6)</sup>). Os valores dos parâmetros da norma ISO 230-2<sup>(6)</sup> estão também apresentados no quadro acima dos gráficos da figura 6.

Como pode ser visto dos gráficos da figura 6, este torno apresenta enormes erros de passo progressivo e falta de repetitividade quando operando no modo de cortar roscas. Os valores dos parâmetros ISO 230-2<sup>(6)</sup>, mostrados no quadro acima dos gráficos, indicam que o desempenho do



torno no tocante a precisão dinâmica é totalmente insatisfatório. Esta máquina tinha sido retrofitada um pouco antes desses testes. Um novo comando numérico de última geração 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 pela assistência técnica do fabricante do comando numérico posteriormente.

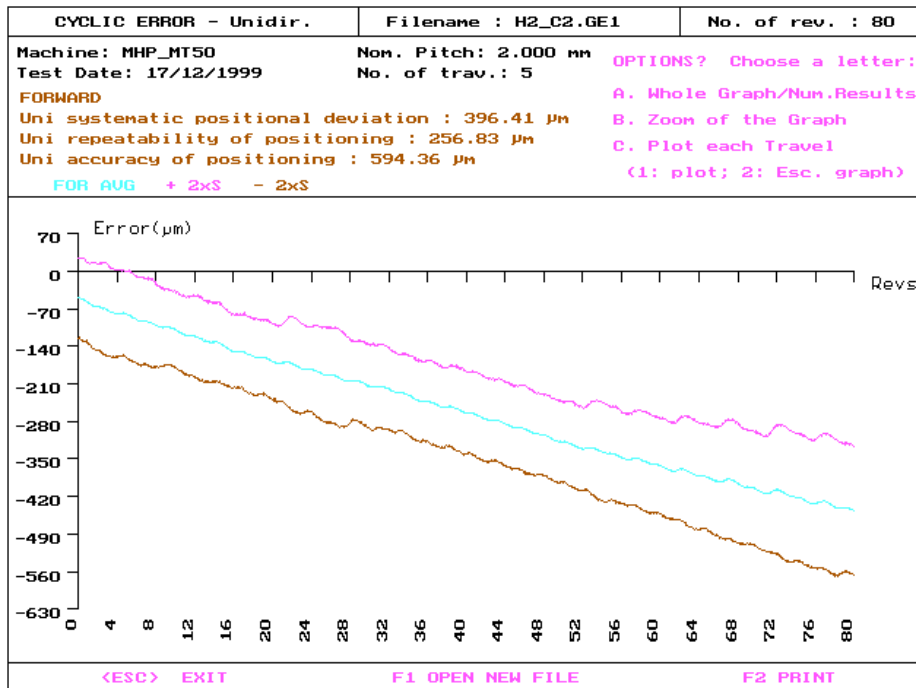


Figura 6. Gráficos dos erros progressivo e cíclico médios e  $\pm 2s$  avaliados em 5 viagens de ida do carro do torno CNC.

Este sistema de medição permite compensar, através do software, as variações do comprimento de onda do laser em função das condições atmosféricas, como também, a expansão 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.

## 6. CONCLUSÕES

1) Um método de medição baseado em laser interferométrico foi desenvolvido para aferir os erros de rotação radial e axial, bem como, os "drifts" térmicos radial e axial de eixos-árvore de máquinas-ferramenta. As medições são realizadas pela reflexão do feixe de laser na superfície de uma esfera padrão que é usada como refletor. Os erros de circularidade desta esfera são compensados através do software do sistema;

2) No sistema de medição proposto, o laser interferométrico 5529A da HP apresenta resolução de 1 nm e frequência de aquisição de dados de até 2,5 MHz. Os erros de rotação são medidos com alta precisão devido à alta exatidão, repetitividade e resolução deste laser. Além disso, a alta taxa de aquisição do laser permite a obtenção de um bom quadro de erros mesmo em altas velocidades de rotação;

3) Uma técnica para aferição dos erros cinemáticos de tornos e retificadoras de rosca operando no modo de cortar roscas e sem forças de usinagem foi desenvolvida. O sistema de medição utiliza o laser interferométrico 5529A da HP para medir o avanço do carro longitudinal da máquina. Um polígono de precisão montado no eixo-árvore em conjunção com um dispositivo de disparo mede a posição angular da árvore. Os erros angulares do polígono são compensados no software do sistema;

4) Este sistema de medição é capaz de aferir as seguintes componentes dos erros cinemáticos: erro de passo progressivo, erro cíclico e erro de flutuação axial da árvore. Esta técnica pode também aferir o atraso do servo-acionamento de máquinas CNC operando no modo de usinar roscas.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ZHANG, G. X. et al. A multipoint method for spindle error motion measurement. **Annals of the CIRP**, v. 46, n. 1, p. 441-445, 1997.
2. PARK, Y. C.; KIM, S.W. Optical measurement of spindle radial motion by Moiré technique of concentric-circle gratings. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Inglaterra, v. 34, n. 7, p. 1019-1030, 1994.
3. IDOWU, A.; GEE, A. E. Wide aperture interferometric spindle metrology: sensitivities and strategies. **Proc. of the Applied Optics Divisional Conference**, 1996. p. 182-187.
4. HOCKEN, R. J. et al. Dynamic machine tool errors. **Report: Technology of Machine Tools - Machine Tool Accuracy**, v. 5, Lawrence Livermore Laboratory, California, 1980. p. 38-52.
5. VANHERCK, P. et al. Continuous measurement of linear motion errors in single tool cutting. **Proc. of the 19th MTD Conference**, 1978. p. 375-381.
6. INTERNATIONAL STANDARDISATION ORGANISATION. **ISO 230-2**: Test code for machine tools - part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled axes. 2. ed. Geneva, 1997. 15 p.

## DYNAMIC METROLOGY OF MACHINE TOOLS USING A LASER INTERFEROMETER: SPINDLE ROTATION AND KINEMATIC ERROR MEASUREMENT

**H. F. F. Castro**

Rua Giulio Romano, 141 - Apto 84 - Vila Nova Alba - São Paulo - SP - CEP: 05358-090

E-mail: heber301@yahoo.com.br

**Abstract.** *This paper presents a laser based calibration system for evaluating the dynamic accuracy characteristics of machine tools. This system incorporates the Hewlett Packard 5529A (Agilent Technologies) laser interferometer as the main measuring instrument as it is capable of performing dynamic calibration. A software package has been developed for data acquisition and data analysis. This calibration system is constituted of two modules as follows: the first one is a Spindle Error Calibrator, designed for assessing radial and axial error motions as well as radial and axial thermal drifts of spindles. The measurement is made using reflection directly from a high precision sphere. This sphere is affixed at the end of a wobble device which is clamped in the spindle. The principle of measurement is similar to that in a linear interferometer. A convergent lens is utilised to focus the laser beam to a small spot on the sphere surface. The second module is a Kinematic Error Calibrator. It assesses kinematic errors of lathes and thread grinding machines in screwcutting mode and free of load. It utilises a precision polygon mounted in the spindle, in conjunction with a trigger device for measuring the angle of rotation of the spindle. The laser interferometer assesses the longitudinal position of the saddle in respect to a retroreflector affixed in the chuck. As the spindle rotates, a string of pulses is generated by the trigger device. These pulses are used for triggering the laser interferometer. Application of these calibrators on CNC machines are carried out.*

**Keywords:** *spindle rotation errors, kinematic errors, laser interferometer.*