

DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TRIBOLÓGICAS DAS GUIAS DE ESCORREGAMENTO DE UM TORNO DE ULTRAPRECISÃO

Marco Paulo Guimarães

Walter Lindolfo Weingaertner

Rodrigo Lima Stoeterau

Daniel Augusto Canali

Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP

Departamento de Engenharia Mecânica – EMC

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Campus Universitário, Bairro Trindade, Florianópolis-SC, Brasil, Caixa Postal 476 – EMC, CEP 88010-970

marco@lmp.ufsc.br

wlw@lmp.ufsc.br

jgdst@emc.ufsc.br

canali@lmp.ufsc.br

Carlos Alberto Martin

Laboratório de Hardware – LHW

Departamento de Engenharia Mecânica – EMC

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Campus Universitário, Bairro Trindade, Florianópolis-SC, Brasil, Caixa Postal 476 – EMC, CEP 88010-970

cam@grucon.ufsc.br

Resumo. *O posicionamento sub-micrométrico em uma máquina de ultraprecisão depende das características das guias, da dinâmica dos acionamentos e da estratégia de controle empregada. O desenvolvimento da estratégia de controle requer a inclusão de parâmetros que permitam melhorar a resposta do sistema. O posicionamento sub-micrométrico se caracteriza por apresentar velocidades de deslocamento extremamente baixas, onde a variação no atrito das guias passa a ser um dos principais fatores que regem a dinâmica do controle. Uma solução para minimizar o problema do atrito em guias consiste no uso de guias fluido-dinâmicas ou fluido-estáticas, onde o atrito entre superfícies sólidas é substituído pelo atrito fluido. Quando tal solução não pode ser empregada, em especial quando se utilizam guias de escorregamento, o entendimento do comportamento tribológico é de fundamental importância para o desenvolvimento da estratégia de controle para posicionamento sub-micrométrico. Este trabalho tem como objetivo determinar as características tribológicas das guias de escorregamento utilizadas em uma máquina-ferramenta para usinagem de ultraprecisão. Para tanto foram utilizadas técnicas para monitoramento da velocidade de deslocamento da mesa e do torque desenvolvido pelo acionamento. As informações obtidas permitem a construção do mapa estático do atrito, que descreve as características tribológicas das guias utilizadas como objeto de estudo.*

Palavras-chaves: ultraprecisão, tribologia, guias de escorregamento, stick-slip, atrito.

1. INTRODUÇÃO

As características tribológicas, em especial as relativas ao atrito, fornecem fatores fortemente dominantes em qualquer sistema de controle onde se deseja obter posicionamento de

alta precisão. Associada à dinâmica dos acionamentos e a fatores como rigidez do conjunto, variações de carga, entre outros, a estratégia de controle empregada requer conhecimento sobre os parâmetros do atrito no sistema, para que se possa atuar no sentido de manter a planta sempre estável e responder com máxima rapidez a qualquer perturbação estática ou dinâmica sobre o processo.

O posicionamento sub-micrométrico é caracterizado por operar com velocidades de deslocamento extremamente baixas e, quando combinadas com guias de escorregamento, as variações na força de atrito favorecem o aparecimento do fenômeno *stick-slip*. Estas flutuações na força de atrito dinâmico e a instabilidade com o atrito estático levam à necessidade de se compreender como estes atuam sobre o controle, e a forma de monitorá-los.

Isso levou à necessidade de levantamento do mapa estático do atrito das guias, onde cada valor de velocidade em regime permanente é associado a um valor de força de atrito. A partir do mapa estático do atrito no posicionador é possível determinar a faixa de velocidades livre de *stick-slip*. Assim, pode-se verificar se esta faixa de velocidades se encontra dentro da faixa de velocidades requeridas na usinagem de ultraprecisão.

Porém, o *stick-slip* estará sempre presente em velocidade próximas a zero, principalmente em guias de escorregamento, e por isso não é recomendada a reversão no sentido de movimentação enquanto a ferramenta estiver em contato com a peça. Como a máquina em estudo produz espelhos metálicos planos ou cônicos, e com um furo no centro, não há necessidade de parada ou reversão do avanço da ferramenta com esta em contato com a peça. Assim, consegue-se evitar os problemas inerentes ao *stick-slip* nas velocidades próximas a zero.

Além disto, as informações obtidas sobre o atrito podem auxiliar no desenvolvimento do sistema de controle, permitindo controlar o sistema com auxílio de sensores, conforme a Fig. (1).

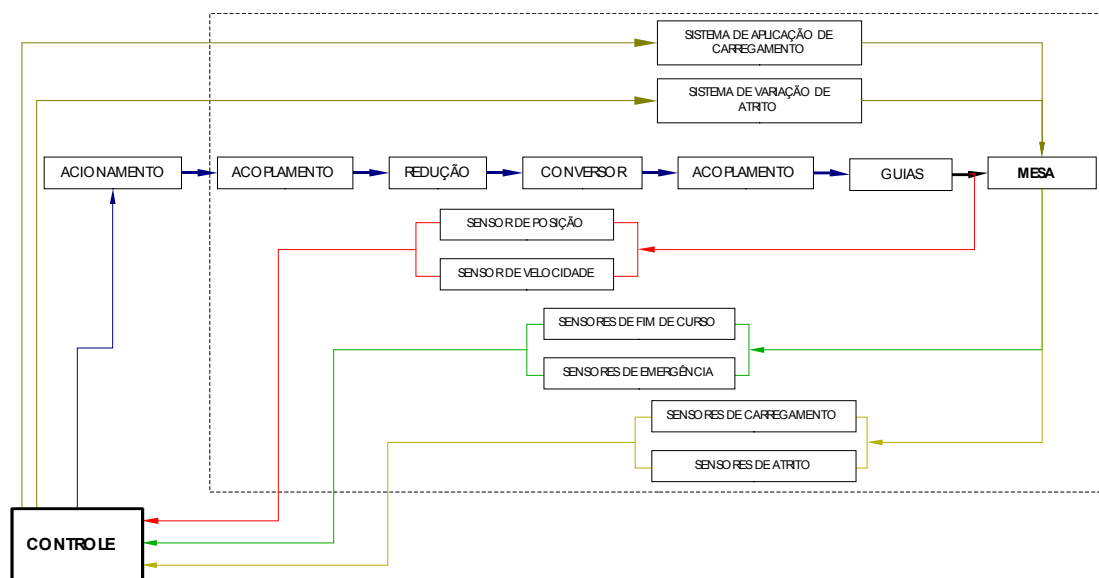


Figura 1. Esquema da malha de controle da máquina-ferramenta

2. O ATRITO

Apesar de ser um dos fenômenos da natureza com o qual a engenharia se defronta no dia-a-dia, o atrito ainda não tem sua natureza física completamente explicada. A força de atrito definida como a força de resistência entre dois ou mais corpos com movimento relativo é regida por três leis empíricas:

- 1) A força de atrito é proporcional à força normal;
- 2) A força de atrito é independente da área aparente de contato, e
- 3) A força de atrito é independente da velocidade de deslizamento.

Com base nas leis do atrito é possível estabelecer uma função sinal descrita por D'Elia (2003), a

qual é dada pela Eq. (1):

$$F_C = \mu \cdot F_N \cdot \text{sng}(\dot{\chi})$$

$$\text{sng}(\dot{\chi}) = \begin{cases} +1, & \dot{\chi} > 0 \\ 0, & \dot{\chi} = 0 \\ -1 & \dot{\chi} < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Onde $\dot{\chi}$ é a velocidade relativa entre os dois corpos, μ é o coeficiente de atrito, F_N a força normal e F_C a força de atrito.

Observa-se que a força de atrito é descontínua quando a velocidade é nula. É sabido também que a força necessária para iniciar o deslocamento de um corpo é maior do que a necessária para mantê-lo em movimento. A explicação para este fenômeno é dada através do uso de dois tipos de coeficiente de atrito, um estático μ_s , e outro dinâmico μ_d , em que $\mu_s > \mu_d$.

Uma das soluções adotadas para minimizar os problemas ocasionados pelo atrito é a adição de lubrificantes entre as superfícies. Isto leva ao surgimento de atrito do tipo viscoso, provocado pelo efeito hidrodinâmico do lubrificante, o qual é proporcional à velocidade, ao carregamento e viscosidade do fluido. Em condições de deslocamento a baixas velocidades, a contribuição hidrodinâmica à redução do atrito é muito pequena e pode ser desprezada. Contudo, desde que haja a presença de lubrificante entre as superfícies, assim que o corpo parte do repouso, ocorre uma rápida redução da força de atrito conhecida como efeito Stribeck, conforme pode ser visto na Fig. (2). O efeito Stribeck ocorre em baixas velocidades e gera uma inclinação negativa na curva de atrito versus velocidade. Por sua vez tem importante contribuição para o surgimento do efeito *stick-slip*.

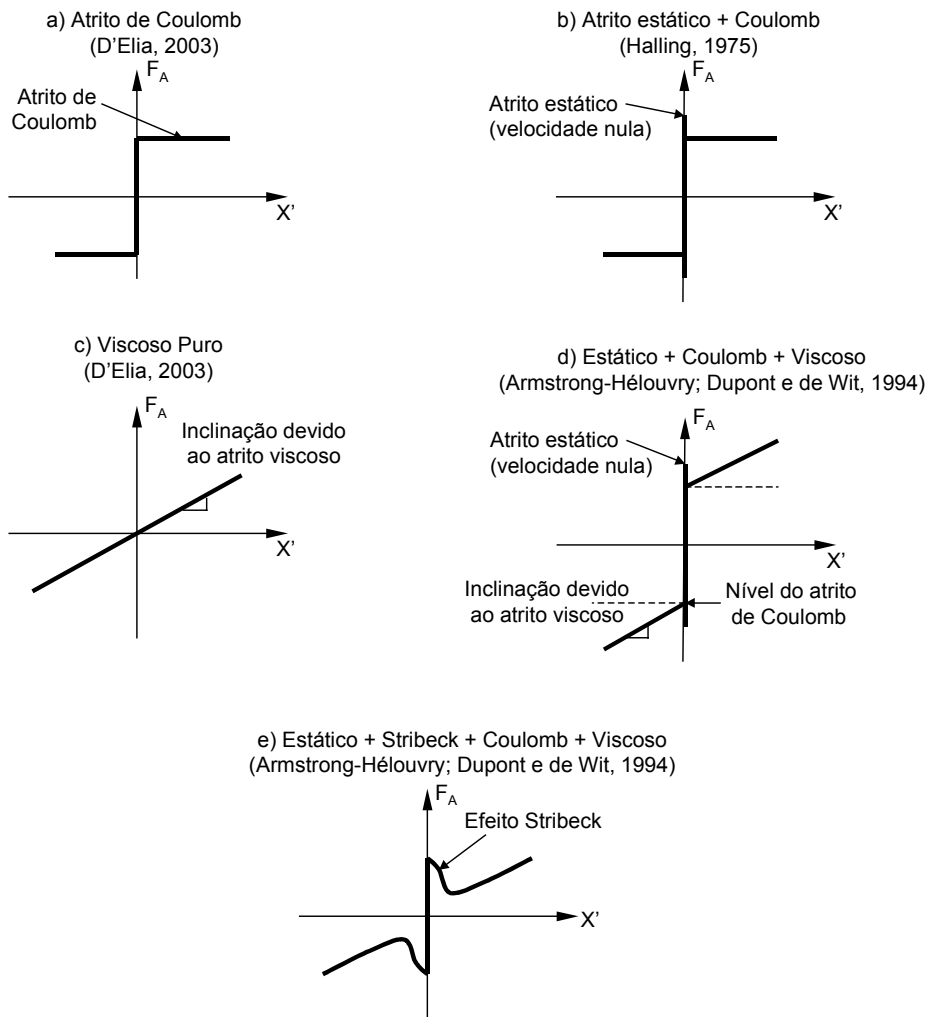


Figura 2. Modelos de atrito

3. OBJETO DE ESTUDO

O objeto de estudo desse trabalho é um conjunto de guias de escorregamento lineares prismáticas com lubrificação, que fazem parte de um torno de ultraprecisão. A Figura (3) apresenta um croqui do sistema com seus principais componentes. O acionamento é feito normalmente por um motor de passo, mas nos ensaios foi usado um motor CC para possibilitar a avaliação do torque no acionamento a partir da medição da corrente de armadura do motor. Este motor CC foi acoplado a uma redução especialmente fabricada para este ensaio, onde foram criados dois estágios de redução adicionais, de 3,75:1 cada. Esta redução, por sua vez, foi acoplada ao sistema de redução original do torno, do tipo parafuso sem fim/engrenagem, com relação de 25:1. Esta solução foi adotada para melhorar a movimentação em baixas velocidades (menores que 10 mm/min). As reduções combinadas estão montadas na extremidade do fuso trapezoidal, responsável pela conversão do movimento rotativo do motor em movimento linear da mesa montada sobre as guias (também chamada de carro).

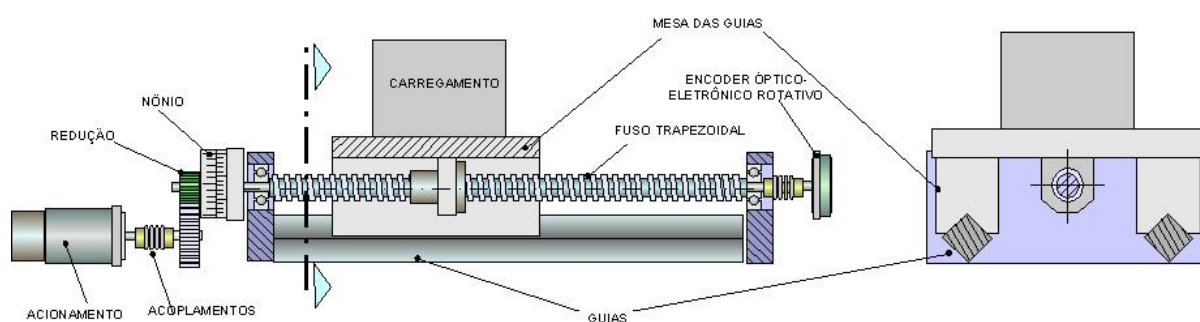


Figura 3. Descrição das guias

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A determinação das curvas torque em função da velocidade requer a aquisição de dois parâmetros básicos: a velocidade de deslocamento da mesa sobre as guias e o torque exercido pelo acionamento.

Os dados referentes à velocidade da mesa foram obtidos de duas maneiras distintas, uma por meio de um tacogerador acoplado ao eixo motor, outra pela diferenciação no tempo dos sinais de posição fornecidos pelo sistema de medição, neste caso uma escala óptica-eletrônica com resolução de 1 μm .

O tacogerador fornece um sinal em tensão proporcional à frequência rotacional do eixo motor. Essa proporcionalidade entre a tensão de saída e a rotação de entrada é regida por meio de uma função de transferência conhecida como constante do tacogerador, que pode ser determinada experimentalmente. A constante do tacogerador pode ser obtida através do acoplamento do eixo do tacogerador com o eixo de um motor CC em funcionamento a vazio (sem carga), com possibilidade de controle da rotação. Variando a rotação no motor, medida com um tacômetro óptico sem contato de alta resolução, e relacionando com a tensão de saída no tacogerador, medida em um multímetro, obtém-se a função transferência, em Volts por RPM. Assim, conhecendo a frequência rotacional do motor e utilizando a relação de redução entre o acionamento e o conversor de movimento (fuso), é possível calcular a velocidade de deslocamento retilíneo das guias da mesa.

A outra maneira a ser utilizada para medição da velocidade de deslocamento da mesa consiste em tratar o sinal de posição da régua óptica acoplada à mesa, utilizada na realimentação da malha de controle. Conhecendo a posição da mesa no tempo é possível chegar aos valores de velocidade, a partir da divisão da distância percorrida pelo tempo decorrido durante tal deslocamento.

As informações referentes ao torque desenvolvido pelo acionamento podem ser obtidas conhecendo a corrente de armadura e a constante de torque de um motor corrente contínua (CC).

Em motores CC a corrente de armadura é proporcional ao torque segundo a Eq. (2), descrita em Martin (1996):

$$T_m(t) = K_t \cdot i(t) \quad (2)$$

Onde: $T_m(t)$ é o torque no motor,
 K_t é a constante de torque do motor e
 $i(t)$ é a corrente de armadura.

A constante de torque K_t pode ser obtida diretamente no catálogo do fabricante do motor ou experimentalmente por ensaio em bancada. Neste trabalho foi utilizada a bancada desenvolvida por Pimentel (1997) para obtenção de valores mais confiáveis para K_t .

A corrente de armadura $i(t)$, por sua vez, pode ser obtida com o uso de um pequeno circuito aliado a um transdutor de corrente (sensor de efeito Hall), que fornece um sinal de tensão proporcional a corrente que circula no motor (em mV). O condutor que liga a fonte de alimentação ao motor passa por dentro do transdutor, que é montado conforme a Fig. (4).

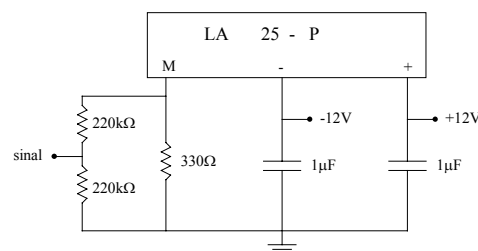


Figura 4. Circuito do transdutor de corrente

Os dados referentes à velocidade da mesa e ao torque no acionamento foram adquiridos utilizando uma placa de aquisição de dados genérica e tratados através de um programa especialmente desenvolvido para este fim, mostrado na Fig. (5). Após tratamento, os mesmos são armazenados em um computador.

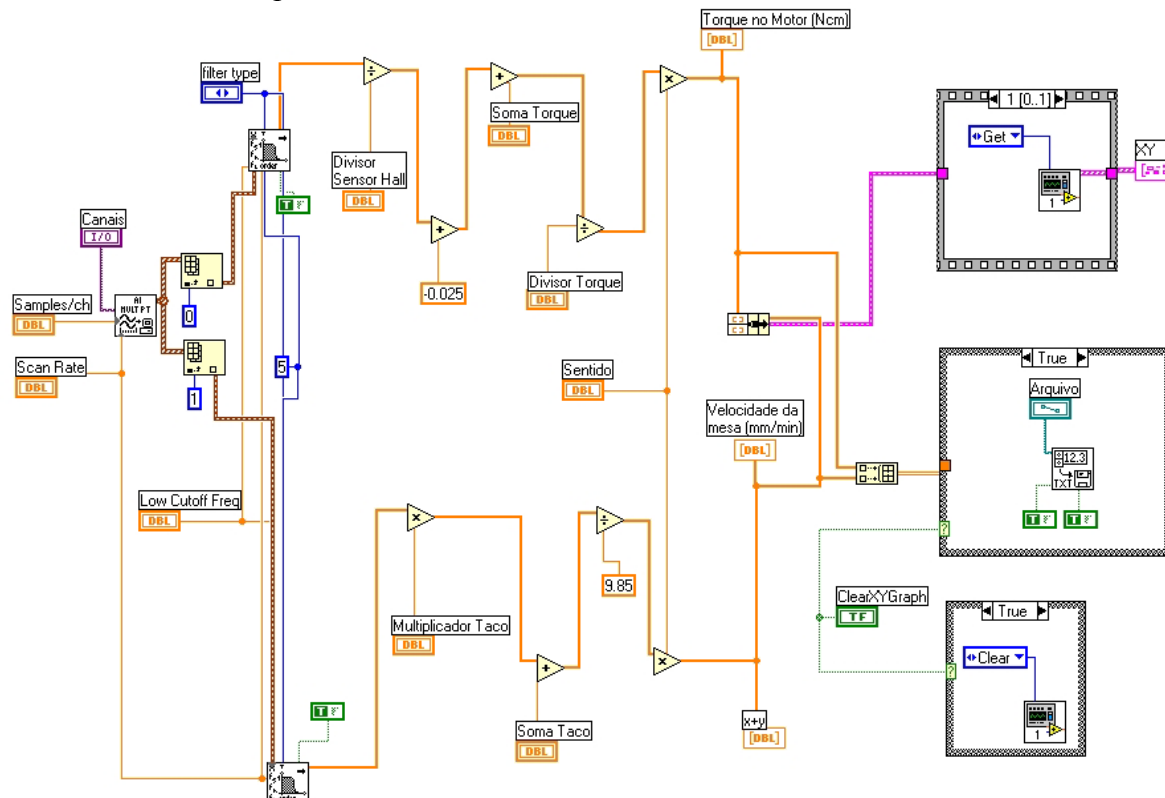


Figura 5. Programa para aquisição e tratamento de dados

Uma série de ensaios foi realizada, a partir da qual foram traçadas curvas de torque vs. tempo, velocidade vs. tempo e torque vs. velocidade, sendo que a Fig. (6) apresenta o esquema da disposição dos equipamentos para realização dos ensaios.

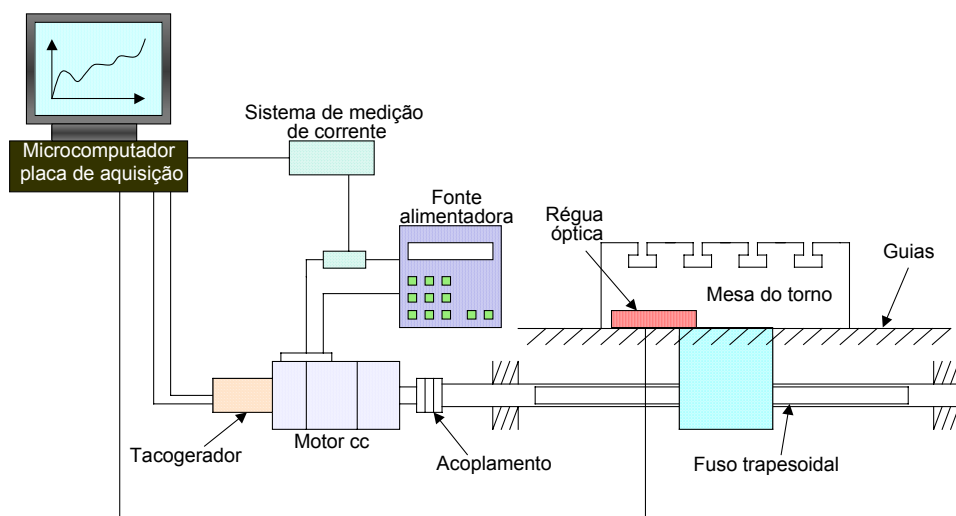


Figura 6. Esquema para execução dos ensaios

Deve-se estar atento para evitar a realização deste ensaio aplicando tensões progressivamente maiores ao acionamento com a mesa imóvel e medindo diretamente os valores de torque e velocidade no momento da partida. Utilizando este método, como o torque do acionamento aumenta até que seja suficiente para vencer o atrito estático, o movimento inicia-se rapidamente, pois o atrito dinâmico é menor que o atrito estático. Consequentemente, uma parcela do torque é despendida para aceleração do conjunto e para deformação elástica dos elementos do sistema de posicionamento. Este procedimento torna o ensaio mais trabalhoso, uma vez que seria necessário criar um equacionamento matemático levando em conta a inércia e a rigidez do sistema, para que fosse possível subtrair a influência das deformações elásticas e da aceleração, restando apenas a parcela do torque referente ao atrito no posicionador.

Pode-se admitir que as deformações elásticas dos elementos da mesa estejam estabilizadas quando esta se desloca em regime permanente, assim a parcela do torque responsável pela deformação elástica pode ser desconsiderada. Da mesma forma, no caso da aceleração, a condição de velocidade constante também é suficiente para garantir que o torque entregue pelo acionamento é devido apenas ao atrito do conjunto.

Assim, é mais vantajoso traçar as curvas de torque e velocidade em função do tempo em velocidade constante e, nesta condição, construir o mapa estático do atrito nas guias. Assim, a construção do mapa estático do atrito consiste em aplicar diferentes tensões constantes no motor, de forma a determinar vários pares de torque vs. velocidade.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base nos ensaios realizados foi possível verificar que havia uma variação periódica no torque necessário para o deslocamento da mesa. Tal efeito não era perceptível quando o acionamento era feito pelo motor de passo. A Figura (7) mostra as variações de velocidade da mesa e o aumento da corrente requerida pelo motor para continuar o movimento da mesa.

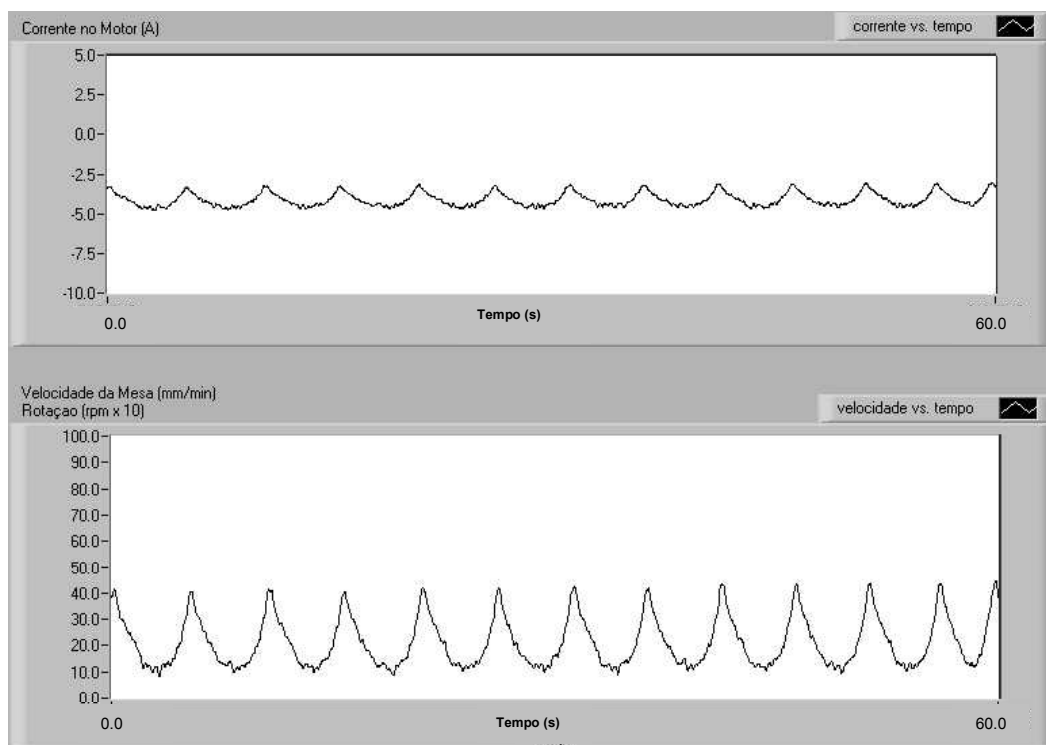


Figura 7. Variação de velocidade de deslocamento da mesa e conseqüente variação na corrente de armadura ao longo do tempo.

Este efeito de aumento e diminuição da velocidade ocorre periodicamente a cada rotação do fuso. Após alguns ensaios verificou-se que o efeito era provocado pelo sistema de medição de posição original do torno. Este sistema é composto originalmente por um nônio com graduação em polegadas. Os tambores do nônio apresentam um defeito de circularidade que provoca o efeito de variação na força de atrito a cada rotação. Assim, em uma volta completa do fuso há uma região em que existe uma pequena folga entre os tambores, caracterizada pelo fácil deslocamento angular do fuso (região de alta velocidade) e uma região em que ocorre interferência entre os pratos, caracterizada pelo aumento da força de atrito e conseqüente baixa na velocidade angular. Para eliminar este efeito, o nônio foi retirado do fuso e um novo sistema da medição de posição foi implementado através de uma escala óptica eletrônica. Todos os teste a seguir foram realizados sem o uso do nônio.

Esta etapa de homogeneização no torque é importante pois, em se tratando de um ensaio em regime permanente, tanto o torque quanto a velocidade da mesa devem estar estáveis no momento da aquisição de um ponto do gráfico. A Figura (8) mostra a pequena variação na velocidade após a retirada do nônio e, nesta condição, os demais pontos experimentais podem ser adquiridos.

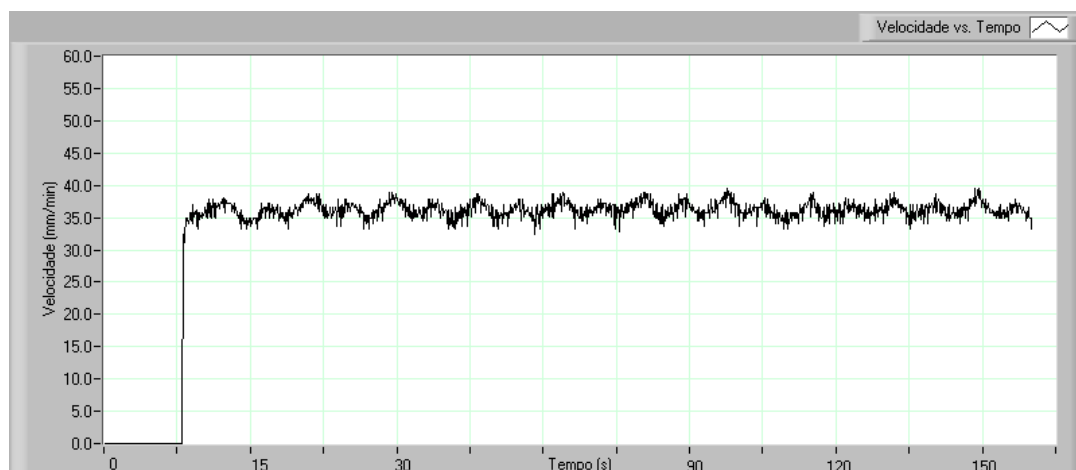


Figura 8. Regime permanente de deslocamento da mesa

Assim, como a construção do mapa estático do atrito consiste em aplicar diferentes tensões constantes no motor, de forma a determinar vários pares de torque vs. velocidade (constante), a Fig. (9) mostra um ponto experimental determinado no ensaio. Para a velocidade constante de 30 mm/min o torque no acionamento é de 6,5 Ncm.

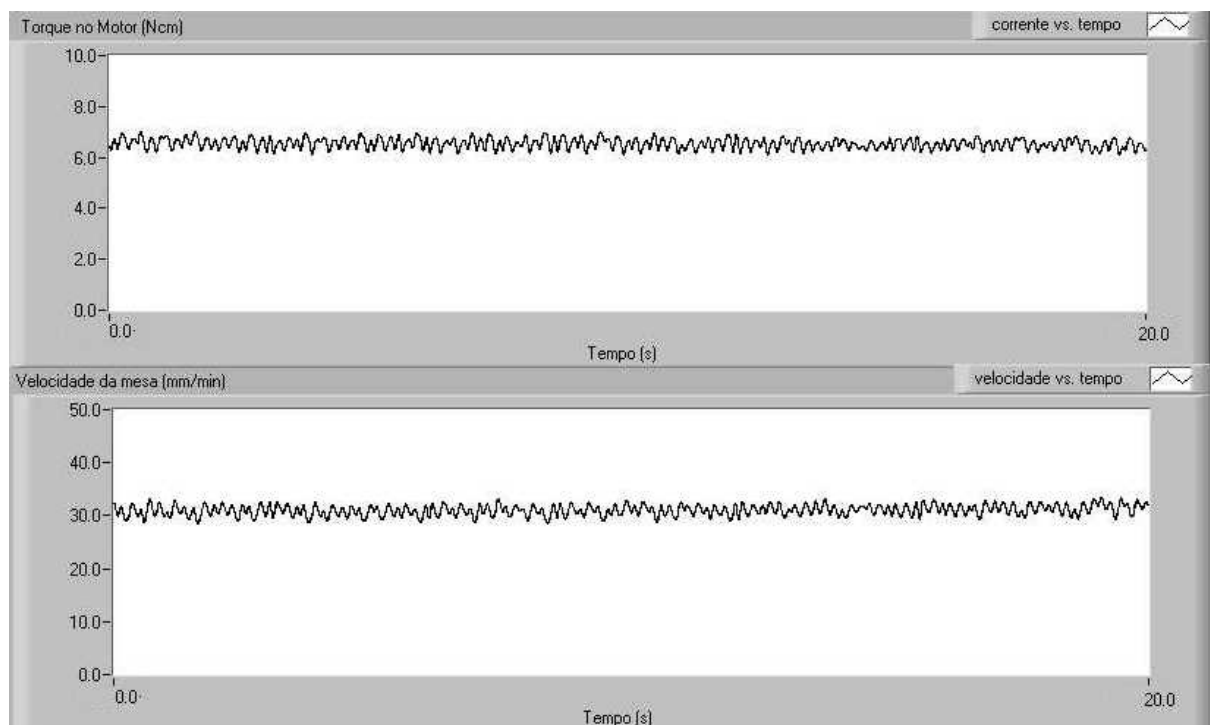


Figura 9. Determinação de um ponto experimental a partir de um par torque-velocidade

Assim, após a identificação de vários pontos experimentais faz-se um ajuste utilizando uma linha de tendência. Cada ponto experimental desenhado no gráfico é uma média aritmética de 500 pontos adquiridos pelo sistema de aquisição, durante a movimentação a uma velocidade constante.

Uma série de pares torque-velocidade identificam o atrito de escorregamento para determinada posição da guia. Como não é possível garantir a mesma condição de lubrificação em cada ponto da guia, e em cada ensaio no mesmo ponto da guia, existem pequenas variações no atrito medido a cada curva traçada. Estas variações são observadas na dispersão dos pontos ao redor da reta de ajuste.

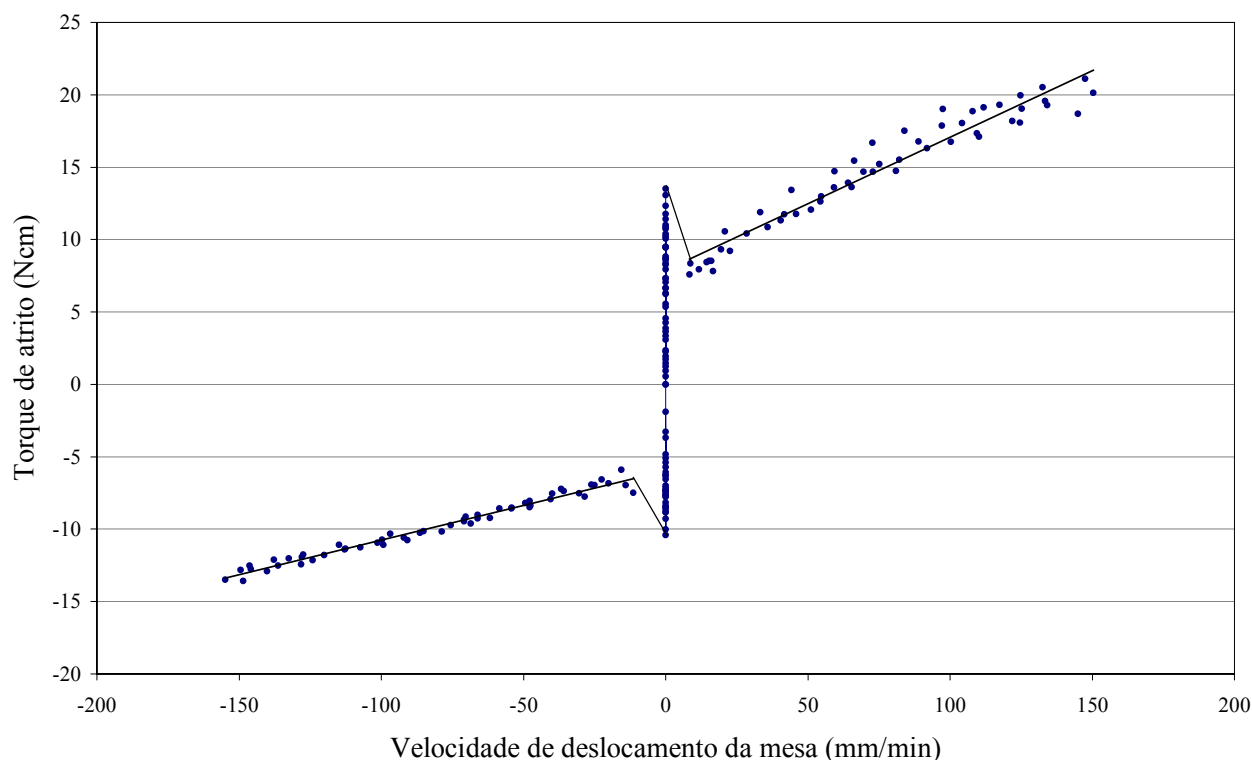


Figura 10. Mapa estático do atrito

6. CONCLUSÕES

Para as guias em estudo, conforme a Fig. (10), em velocidades inferiores a 8 mm/min no sentido positivo de deslocamento e 11 mm/min no sentido negativo, o sistema pode ser afetado pela existência de *stick-slip*. Assim, para o uso destas guias em usinagem de ultraprecisão recomenda-se a operação em velocidades fora desta faixa.

Portanto, nesta máquina não é recomendada a reversão no sentido de movimentação enquanto a ferramenta estiver em contato com a peça. Como a máquina em estudo produz espelhos metálicos planos ou cônicos com um furo no centro, este problema não se manifesta de maneira relevante. Assim, consegue-se evitar os problemas inerentes ao *stick-slip* nas velocidades próximas a zero e usufruir das ótimas características deste tipo de guia, que são a alta rigidez mecânica, pequena folga na movimentação lateral e grande estabilidade térmica.

Assim, para operação em velocidades próximas a zero torna-se imperativo o uso de guias fluídicas ou magnéticas, já que até mesmo guias de rolamento podem apresentar *microstick-slip*.

7. BIBLIOGRAFIA

- Armstrong-Hélouvry, B., Dupont, P., de Wit, C.C., 1994, “A Survey of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for the Control of Machines with Friction”, Elsevier Science.
- D’Elia, C.L.M., 2003, “Compensação de Atrito em Atuadores Hidráulicos Utilizando Redes Neurais”, Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, pp 22-27.
- Halling, J., 1975, “Principles of Tribology”, University of Salford, Macmillan Press.
- Martin, C.A., 1996, “Acionamentos eletromecânicos em automação de máquinas e instrumentos”, UNISINOS / UFSC, Florianópolis, 127 p.
- Pimentel, D.B., 1997, “Bancada de ensaios para acionamentos eletromecânicos fracionários rotativos”, Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 165 p.

DETERMINATION OF THE TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE SLIDING WAYS OF AN ULTRAPRECISION LATHE

Marco Paulo Guimarães

Walter Lindolfo Weingaertner

Rodrigo Lima Stoeterau

Daniel Augusto Canali

Precision Mechanics Laboratory – LMP

Mechanical Engineering Department – EMC

Federal University of Santa Catarina – UFSC, Campus Universitário, Bairro Trindade, Florianópolis-SC, Brasil, P.O. Box: 476 – EMC, Zip code 88010-970

marco@lmp.ufsc.br

wlw@lmp.ufsc.br

jgdst@emc.ufsc.br

canali@lmp.ufsc.br

Carlos Alberto Martin

Hardware Laboratory – LHW

Mechanical Engineering Department – EMC

Federal University of Santa Catarina – UFSC, Campus Universitário, Bairro Trindade, Florianópolis-SC, Brasil, P.O. Box: 476 – EMC, Zip code 88010-970

cam@grucon.ufsc.br

Abstract. *The sub-micrometric positioning in an ultraprecision machine depends on the following aspects: the characteristics of the ways, the dynamics of the drives and the employed strategy of control. The development of the control strategy requires the inclusion of parameters that improve the system performance. The sub-micrometric positioning presents extremely low speeds of displacement, therefore the variation of the friction of the ways becomes one of the most influential factors on the dynamics of the control. A solution to minimize the friction problem in ways consists of the employment of hydrodynamic or hydrostatic ways, where fluidic friction replaces the friction between solid surfaces. When such solution cannot be utilized, especially when sliding ways are used, the understanding of the tribological behaviour has a major importance for the development of the sub-micrometric positioning control strategy. The purpose of this article is to determine the tribological characteristics of the sliding ways of an ultraprecision lathe. In order to attain this objective, techniques to monitor the speed of the table displacement and the torque given by the drive were applied. The obtained information allows the construction of the friction static map, which describes the tribological characteristics of the ways used in this work.*

Keywords: *ultraprecision, tribology, sliding ways, stick-slip, friction.*