

ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE GUIAS DE MÁQUINAS-FERRAMENTA: GUIAS DE ESCORREGAMENTO, DE ROLAMENTO, HIDROSTÁTICAS E AEROSTÁTICAS

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. Neste trabalho é apresentada uma análise comparativa entre guias de escorregamento, de rolamento, hidrostáticas e aerostáticas considerando vários parâmetros que afetam o seu desempenho. Os parâmetros analisados são os seguintes: atrito, desgaste, capacidade de carga, rigidez, amortecimento e eficiência mecânica. O comportamento de atrito da guia tem uma influência sobre a taxa de geração de calor, a faixa de velocidades de operação, a precisão de posicionamento e a uniformidade de movimento do elemento móvel (mesa, carro) da máquina. São descritos também os tipos de desgastes a que estas guias estão submetidas. As características tribológicas das guias de escorregamento podem ser melhoradas com o uso de materiais plásticos a base de PTFE, resina epoxi, poliamida e de acetal. Para satisfazer as exigências por guias de baixo atrito e com altíssima rigidez é apresentado um exemplo de guia combinada escorregamento/rolamento. Por outro lado, o amortecimento mecânico fornecido pelas guias é de grande importância para a estabilidade dinâmica dos sistemas de avanço da máquina. Assim, são descritos de que modo os diferentes tipos de guias contribuem para amortecer as vibrações mecânicas na máquina. Por fim é analisada a influência do tipo de guia sobre a eficiência mecânica do sistema de avanço, tendo como variável o porte do elemento móvel e o tipo de fuso usado na máquina.

Palavras-chave: guias de máquinas; escorregamento; rolamento; hidrostática; aerostática

1. INTRODUÇÃO

As guias são elementos orgânicos de máquina que têm a função de guiar objetos e suportar as cargas que agem sobre os mesmos durante a operação da máquina. Elas necessitam ter os seguintes requisitos operacionais: alta precisão de movimento, alta capacidade de carga e rigidez, mínimo atrito e desgaste, alto nível de amortecimento mecânico, durabilidade e baixo consumo de potência.

Os tipos de guias mais empregados em máquinas-ferramenta são as guias de escorregamento, as hidro e aerostáticas, as de rolamento e as combinadas. As guias magnéticas ainda têm pouca utilização em máquinas-ferramenta comparando-se com os outros tipos citados.

Uma máquina-ferramenta que realiza operação de usinagem apresenta os seguintes movimentos de trabalho: movimento de corte, o de avanço e os auxiliares. Por meio dos dois primeiros movimentos é que a máquina faz a remoção de material da peça em bruto transformando-a numa peça acabada com dimensões, geometria e rugosidade superficial estabelecidas no projeto.

Cada um desses três movimentos de trabalho são realizados por elementos móveis, tais como, mesas, eixos-árvores, carros de avanço e porta-ferramenta. Os movimentos indesejáveis associados a estes elementos móveis são restringidos pelas guias, com exceção de eixos-árvores onde são usados mancais.

Para que a peça usinada na máquina satisfaça às tolerâncias dimensionais, geométricas e rugosidades superficiais especificadas no projeto, é imprescindível que os movimentos de trabalho sejam realizados com precisão e estabilidade. Como as guias são responsáveis pela condução de quase todos os movimentos de trabalho, elas têm grande importância na precisão e estabilidade da máquina.

Neste trabalho é feita uma análise comparativa entre guias de escorregamento, de rolamento, hidrostáticas e aerostáticas. Esta análise é baseada nos parâmetros que afetam o seu desempenho. Os parâmetros considerados são os seguintes: atrito, desgaste, capacidade de carga, rigidez, amortecimento e eficiência mecânica. O artigo é, essencialmente, uma revisão da literatura mesclado com alguns aspectos novos sobre o amortecimento das guias em função da velocidade de translação, bem como sobre a influência do tipo de fuso de movimento e da guia no rendimento mecânico do sistema de avanço.

2. COMPORTAMENTO DE ATRITO

A figura 1 mostra o comportamento típico do coeficiente de fricção em relação à velocidade de translação para vários tipos de guias.

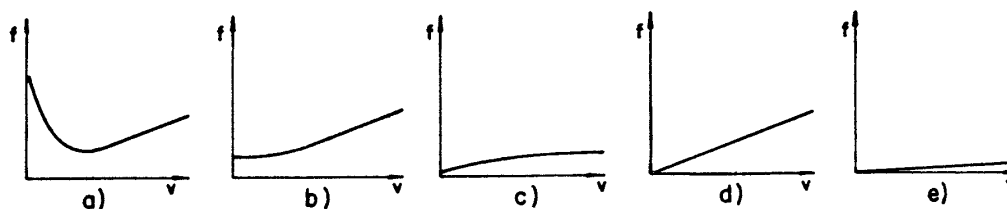


Figura 1. Curvas do coeficiente de fricção f em função da velocidade v para os seguintes tipos de guias: a) escorregamento (metal/metal); b) escorregamento (plástico/metal); c) rolamento; d) hidrostática; e) aerostática.

Na seqüência, são feitas comparações entre as guias mencionadas na figura 1 no tocante aos seguintes aspectos: coeficiente de fricção, precisão de posicionamento, uniformidade de movimento, potência de fricção e faixa de velocidades de operação.

i) Os coeficientes de fricção normais médios, sob condições de lubrificação, para as guias designadas nos itens de (a) a (e) da figura 1, são, respectivamente, 0,1 , 0,05, 0,003, $<0,001$, $\ll 0,001$;

ii) O erro de posicionamento do elemento móvel é diretamente proporcional ao nível de atrito nas guias. Desta forma, tem-se para as guias da figura 1, que tal erro decresce no sentido de (a) para (e);

iii) Apenas a guia de escorregamento (metal/metal) está sujeita ao fenômeno do "stick-slip", principalmente em velocidades muito baixas (Apêndice A). Isto se deve à declividade negativa da curva " $f \times v$ " na região de lubrificação limite e mista, associada à elasticidade dos elementos de transmissão mecânica. A não uniformidade de movimento devida ao "stick-slip" afeta negativamente a precisão de posicionamento e de usinagem, o acabamento superficial das peças e a quantidade de desgaste das guias. Por outro lado, o "stick-slip" causa também instabilidade no sistema de controle de posição de máquinas CNC. Para evitar ou reduzir a amplitude do "stick-slip" é necessário adotar uma ou algumas das seguintes medidas: aumento da rigidez, amortecimento e frequência natural do mecanismo de avanço; emprego de óleos "anti-stick-slip", por exemplos: óleo mineral com aditivo polar ou com bissulfeto de molibdênio (MoS_2) ou grafite; aplicação de revestimentos plásticos nas guias do elemento móvel.

iv) A potência de fricção gerada pelo atrito nas guias varia diretamente com o coeficiente de fricção e com a velocidade do elemento móvel. Esta potência decresce no sentido das guias citadas nas letras de (a) a (e) da figura 1. Sob este aspecto, o emprego de guias aerostáticas, hidrostáticas e

de rolamento é recomendável, principalmente em situações onde se têm velocidades muito altas (Apêndice A). Contudo, em guias hidrostáticas, se a velocidade do elemento móvel exceder a velocidade de saída do óleo da sapata na direção do movimento, ocorrerá entrada de ar através da folga da soleira para o interior das sapatas de frente, prejudicando assim, o desempenho da guia (capacidade de carga, rigidez). Por isso, é desaconselhável o seu uso em velocidades acima desse limite;

v) Para a análise da faixa de velocidades de operação das guias, são considerados os seguintes fatores: geração de calor; efeito "stick-slip"; desgaste (vida útil) e degeneração dos materiais. Não se recomenda o uso de guias de escorregamento (metal/metal) em máquinas que operam, freqüentemente, em velocidades muito baixas e sob cargas elevadas (problemas do "stick-slip"). Também não são apropriadas para velocidades muito altas devido à excessiva geração de calor. As guias de escorregamento (plástico/metal) não estão sujeitas ao efeito "stick-slip". Assim, elas podem operar na faixa das muito baixas às altas velocidades. Não é aconselhável utilizar tais guias em velocidades muito altas, pois pode haver degeneração rápida do material plástico que é fixado ao elemento móvel. As guias hidro e aerostáticas e de rolamento são adequadas para todas as faixas de velocidades. Para as hidrostáticas valem as restrições apresentadas no item "iv" acima.

3. DESGASTE

As guias hidro e aerostáticas por trabalharem em regime de lubrificação de filme fluido não apresentam desgastes. No caso das guias aerostáticas, pode-se ter desgaste corrosivo nas suas superfícies de trabalho devido à contaminação ou umidade presente no ar comprimido ou ambiental.

As guias de escorregamento apresentam os desgastes adesivo e abrasivo nas suas superfícies de trabalho, enquanto as guias de rolamento, o desgaste por fadiga superficial. Sob as mesmas condições de operação, a taxa de desgaste das guias de escorregamento é bem maior do que a das de rolamento.

No caso onde se tem desgaste adesivo ou abrasivo de 3 corpos, as guias de escorregamento (plástico/metal) apresentam menor desgaste individual em relação às guias de escorregamento (metal/metal). Contudo, nos casos onde ocorre desgaste abrasivo de dois corpos, o plástico apresenta desgaste bem maior do que o metal (por exemplo: aço ou ferro fundido). Em qualquer situação, por ser o plástico mais mole e ter menor afinidade atômica com o metal, ele causa menor desgaste no outro elemento do par (metal). Este fato é importante visto que é a guia do barramento a responsável pelo alinhamento do elemento móvel.

4. MATERIAIS PLÁSTICOS USADOS EM GUIAS DE ESCORREGAMENTO

Os revestimentos plásticos utilizados em guias de escorregamento apresentam as seguintes propriedades: a) baixo coeficiente de atrito; b) ausência de "stick-slip" (coeficiente de fricção dinâmico maior ou igual ao coeficiente de fricção estático); c) baixa taxa de desgaste; d) baixo custo de fabricação e aplicação.

Os revestimentos plásticos são usualmente aplicados nas guias do elemento móvel, pelo fato delas oferecerem maiores facilidades para aplicação e manutenção. Além disso, tal procedimento proporciona redução no custo e na freqüência de reparação das guias do barramento.

Os tipos de plásticos normalmente utilizados em guias de escorregamento são os seguintes:

1) material a base de politetrafluoretileno (PTFE) com enchimento de bronze⁽¹⁾, vidro, grafite, bissulfeto de molibdênio, cerâmica ou uma combinação destes;

2) resinas a base de epoxi com enchimentos especiais;

3) poliamida (náilon) com enchimento de grafite, MoS₂, fibra de vidro, PTFE ou uma combinação destes;

4) acetal com enchimento de MoS₂, cerâmica ou PTFE.

As propriedades destes plásticos são determinadas pela estrutura molecular de sua resina, pelas condições de processamento e pelos tipos de enchimentos empregados na sua fabricação. Os

enchimentos são utilizados para melhorar as suas propriedades mecânicas, tribológicas e físico-químicas. Entretanto, é necessário ter em mente que as propriedades químicas, elétricas e térmicas dos plásticos são determinadas, principalmente pela sua resina de base.

5. CAPACIDADE DE CARGA E RIGIDEZ

A capacidade de carga e rigidez das guias mencionadas na figura 1 são função de um grande número de parâmetros de projeto. Para exemplificar, tem-se nas guias de escorregamento: par de materiais; área de contato; acabamento superficial; dureza; pressão admissível de contato. Nas hidrostáticas: pressão de alimentação de óleo; área efetiva das sapatas; razão de resistências hidráulicas entre o restritor de entrada e de saída da sapata. Nas de rolamento: forma, número, dimensões e geometria de contato dos elementos rolantes. Além disso, dependem também da faixa de variação da carga e das formas construtivas da guia.

Numa análise qualitativa, pode-se dizer que, como regra geral, a guia hidrostática apresenta a maior capacidade de carga, vindo, em ordem decrescente, as guias de escorregamento, de rolamento e aerostáticas.

A capacidade de carga das guias de escorregamento é limitada, principalmente pelo produto "pressão de contato x velocidade" (desgaste adesivo). Nas de rolamento, tais limitações estão relacionadas com as deformações permanentes máximas admissíveis para as pistas e elementos rolantes.

Em relação à rigidez, pode-se afirmar que a guia de escorregamento apresenta a maior rigidez estática por unidade de área, vindo, em ordem decrescente, as guias hidrostáticas, de rolamento e aerostáticas.

Com guias hidrostáticas, pode-se obter altíssima rigidez utilizando-se sapatas pré-carregadas (duplo efeito) com restritores hidráulicos auto-reguláveis (por exemplo: restritor controlado por diafragma - DCR). Para que isso seja possível, é necessário que todas as suas estruturas construtivas sejam bastante rígidas, a fim de evitar que deformações causadas pelos altos empuxos hidráulicos possam comprometer o desempenho previsto no projeto. Isto constitui a principal desvantagem da guia hidrostática do ponto de vista técnico. No caso da aplicação de cargas pulsantes em guias hidrostáticas, verifica-se que sua rigidez cresce rapidamente com o aumento da frequência da carga. Isto se deve à ação do "squeeze-film".

Com o objetivo de aumentar a rigidez estática normal de máquinas-ferramenta que operam com guias de rolamento, pode-se utilizar uma guia de escorregamento atuando paralela à de rolamento. Com esta combinação, obtêm-se as vantagens da guia de escorregamento (alta rigidez e amortecimento) e da guia de rolamento (baixo atrito). A figura 2 mostra uma guia combinada escorregamento/rolamento, que utiliza patins de rolos recirculantes que são pré-carregados com molas prato⁽²⁾.

As molas prato são dimensionadas de forma que as guias de escorregamento suportem, por exemplo, cerca de 20% do peso próprio do elemento móvel. Os restantes 80% são aplicados nos patins de rolos. Como a flexibilidade das molas prato é bem maior que a da guia de escorregamento, pode-se considerar que praticamente toda carga externa (força de corte, peso da peça de trabalho) será suportada pela guia de escorregamento. Esta guia combinada é adequada para máquinas de grande porte, onde as forças externas são pequenas quando comparadas ao peso do elemento móvel. Nesta situação, a maior parte das forças verticais atuantes sobre as guias é suportada pelos patins de rolos. Isto significa que a resistência ao movimento devido ao atrito nas guias será baixa. Por outro lado, como as forças externas são suportadas quase que totalmente pelas guias de escorregamento, verifica-se que durante o processo de usinagem, a máquina operará com alta rigidez e amortecimento.

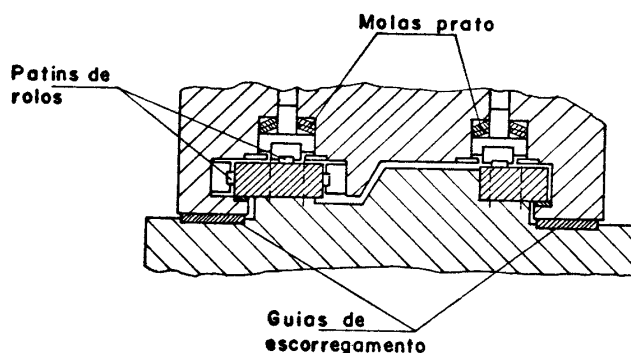


Figura 2. Guia combinada escorregamento/rolamento com patins de rolos e molas prato⁽²⁾.

6. AMORTECIMENTO MECÂNICO

Para abordar o amortecimento em guias é apresentado na figura 3, um modelo físico-matemático de um mecanismo de avanço de uma máquina-ferramenta. Os elementos deste modelo que interessam na presente análise são descritos a seguir: m - massa da mesa; k - rigidez do mecanismo de avanço; c_1 - coeficiente de amortecimento viscoso equivalente do mecanismo de avanço; c_2 - coeficiente de amortecimento viscoso devido à viscosidade do óleo lubrificante da guia; F_c - força de fricção de Coulomb; x - deslocamento da mesa; x_c - posição fornecida pelo comando. A guia do modelo é a de escorregamento. Contudo, nesta análise pode-se utilizar outro tipo de guia.

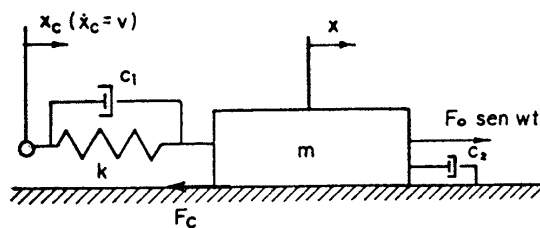


Figura 3. Modelo esquemático de um mecanismo de avanço submetido a uma excitação senoidal.

Inicialmente, é necessário distinguir as duas direções segundo as quais, as guias amortecem vibrações mecânicas: na direção de movimento e na normal ao movimento.

Os mecanismos de amortecimento nas guias na direção de movimento são os seguintes: para guia de escorregamento tem-se a fricção de Coulomb e a força de resistência causada pela viscosidade do óleo lubrificante; na guia de rolamento, o amortecimento é proporcionado pelo atrito de rolamento e pela força devida ao atrito fluido; nas guias hidro e aerostáticas têm-se somente o atrito fluido devido à viscosidade do óleo e ar, respectivamente.

Na direção normal ao movimento, os mecanismos de amortecimento são: efeito "squeeze-film" (guia de escorregamento e hidrostática); microdeslizamentos, na interface de contato, causados pelas deformações elásticas e plásticas das rugosidades superficiais bem como a histerese dos materiais (guia de escorregamento e rolamento).

A seguir, é apresentada uma breve análise sobre o amortecimento devido à fricção de Coulomb em guias de escorregamento. Esta abordagem pode ser estendida para guias de rolamento, trocando a força de Coulomb F_c pela do atrito de rolamento. Para se estudar o amortecimento de vibrações no sistema de avanço da figura 3, duas situações são estabelecidas: a) $0 \leq v < Xw$; b) $v \geq Xw$. v é a velocidade de avanço fornecida pelo comando da máquina e Xw é a amplitude da velocidade de vibração.

a) Para $0 \leq v < Xw$

A energia dissipada em um período de vibração devido à fricção de Coulomb é

$$E_d = \int_0^{2\pi/w} F_c [v - Xw \cos(wt + \frac{\pi}{2})] \text{sinal}(\dot{x}) dt \quad (1)$$

Resolvendo a equação (1) resulta na seguinte expressão:

$$E_d = E_{d1} + E_{d2} \quad (2)$$

E_{d1} é a parcela de energia dissipada pela fricção de Coulomb devida ao efeito de mudança de sinal da velocidade da mesa \dot{x} (efeito vibratório). E_{d2} é a parcela de energia dissipada pela fricção de Coulomb devida ao movimento de avanço da mesa v (efeito de translação). As equações de E_{d1} e E_{d2} são:

$$E_{d1} = \frac{4F_c \sqrt{(Xw)^2 - v^2}}{w} \quad (3)$$

$$E_{d2} = \frac{2F_c v}{w} (2 \cos^{-1} \frac{v}{Xw} - 3\pi) \quad (4)$$

A energia dissipada E_{d1} é a que contribui para o amortecimento de vibrações da mesa. Igualando-se E_{d1} à expressão da energia consumida num ciclo de vibração devido à força de amortecimento viscoso $C_{eq}(\dot{x} - v)$, obtém-se

$$C_{eq} = \frac{4F_c \sqrt{(Xw)^2 - v^2}}{\pi(Xw)^2} \quad (5)$$

onde, C_{eq} é o coeficiente de amortecimento viscoso equivalente. Nesta análise, o amortecimento proporcionado pela fricção de Coulomb foi transformado num amortecimento viscoso equivalente. Isto foi feito para simplificar e visualizar melhor os parâmetros do problema.

b) Para $v \geq Xw$

Neste caso, a velocidade total da mesa \dot{x} não muda de sinal e assim desaparece o efeito vibratório. Logo, a força de Coulomb não amortecerá vibrações, ou seja $C_{eq} = 0$.

Em vista do exposto, tem-se que em guias de escorregamento e de rolamento, o amortecimento é nulo, na direção de movimento, devido à fricção de Coulomb ou de rolamento, para velocidades de avanço maior ou igual a máxima velocidade de vibração (Xw) da mesa. Por outro lado, experimentos realizados em guias de escorregamento (aço/fofo) lubrificadas⁽³⁾, indicaram que o amortecimento viscoso das guias dado por c_2 (fig. 3) decresce com o aumento da velocidade de avanço.

Poláček e Vavra⁽⁴⁾ verificaram que para forças de excitação harmônica de frequência entre 25 a 250 Hz e para velocidades de avanço entre 0 e 300 mm/min, as guias de escorregamento têm maior capacidade de amortecimento na direção do movimento do que as guias hidrostáticas e de rolamento.

Hashizume e Shinno⁽⁵⁾ estudaram o comportamento dinâmico de uma mesa de posicionamento nanométrico equipada com servomotor CC linear, guia aerostática e unidade de amortecimento com fluido eletroreológico (FE). Neste estudo, uma força perturbadora senoidal de 1 N foi aplicada ao servomotor via sistema de controle de posicionamento da mesa. Os experimentos indicaram que para velocidades de avanço de até 600 mm/min a unidade com FE contribuiu efetivamente para reduzir a amplitude do deslocamento de vibração da mesa. Contudo, para velocidade igual ou maior que 6 m/min, a unidade com FE não teve qualquer efeito na redução da vibração.

De acordo com o estudo apresentado nesta seção e nas referências^(3,4,5) verifica-se que o amortecimento das guias decresce com o aumento da velocidade de avanço. Como regra geral, pode-se afirmar que, na direção de movimento, para velocidades de avanço baixas, as guias de escorregamento apresentam maior capacidade de amortecimento, vindo, em ordem decrescente, as guias de rolamento, as hidrostáticas e as aerostáticas. Contudo, à medida que a velocidade de avanço aumenta, todas as guias tendem a apresentar praticamente o mesmo nível de amortecimento, exceto a guia aerostática por causa da baixíssima viscosidade do ar.

Outro aspecto importante para o amortecimento das guias é sua curva "fricção x velocidade" (fig. 1). Neste sentido, é desejável ter esta curva com declividade positiva, como é o caso das guias de escorregamento (plástico/metal), hidrostáticas e aerostáticas, e até mesmo das guias de rolamento. Esta característica é importante, pois contribui para o amortecimento das vibrações no elemento móvel, e conseqüentemente, para a estabilidade dinâmica do mecanismo de avanço. Do contrário, pode ocorrer inclusive vibrações auto-excitadas (efeito "stick-slip").

O gradiente de amortecimento mecânico D_m de um mecanismo de avanço pode ser expresso pela seguinte equação⁽⁶⁾:

$$D_m = \frac{1}{2} C_v \sqrt{\frac{1}{k \cdot m}} = \frac{C_v}{C_c} \quad (6)$$

onde, C_v é o coeficiente de amortecimento viscoso equivalente total; k é a rigidez do mecanismo de avanço; m é a massa do elemento móvel; C_c é o coeficiente de amortecimento crítico.

Este gradiente mede a capacidade de amortecimento do mecanismo de avanço. A maior parte de D_m é proveniente do atrito originado nas guias⁽⁶⁾. Para aumentar este gradiente deve-se elevar o valor de C_v . Para isso, é necessário aumentar os coeficientes de amortecimento viscoso c_1 , c_2 e C_{eq} (fig. 3). c_1 está relacionado às diversas formas de amortecimento presentes nos mancais, fuso de movimento, acoplamentos, etc. c_2 depende da viscosidade e aditivo do óleo lubrificante da guia. C_{eq} relaciona-se com a parcela do atrito de Coulomb ou de rolamento que efetivamente contribui para o amortecimento de vibrações no elemento móvel.

Pode-se aumentar o amortecimento do mecanismo de avanço através da elevação do nível de atrito. Por exemplo, no caso de guias de rolamento tem-se a opção de aumentar a pré-carga. Contudo, o aumento do atrito reduz a precisão de posicionamento do elemento móvel. Para satisfazer estes dois requisitos recomenda-se utilizar para o gradiente de amortecimento, valores na faixa de 0.1 a 0.2⁽⁶⁾.

Outra forma de aumentar este gradiente é utilizar guias combinadas rolamento/escorregamento ou aerostática/escorregamento. No caso de guias de rolamento pode-se também elevar este gradiente através do emprego de gaiolas artificialmente amortecidas⁽⁷⁾. Óleos minerais com aditivo polar fornecem maior amortecimento que os óleos minerais puros, principalmente em baixas velocidades⁽⁶⁾.

Considerando agora a direção normal ao movimento, pode-se concluir que as guias de escorregamento têm maior capacidade de amortecimento normal, vindo, em ordem decrescente, as hidrostáticas, de rolamento e as aerostáticas. Para se elevar o amortecimento na direção normal, pode-se utilizar dispositivos "squeeze-film".

7. EFICIÊNCIA MECÂNICA

Neste tópico, é feita uma análise sobre a influência do tipo de guia sobre o rendimento mecânico do sistema de avanço, tendo como variável o porte do elemento móvel e o tipo de fuso de movimento usado na máquina.

O porte do elemento móvel é dado pelo parâmetro G/F_u , onde G é o peso do elemento móvel (carro, mesa) e F_u é a força de usinagem (avanço ou corte) na direção do movimento. Baseado no critério apresentado na referência⁽⁸⁾, pode-se concluir que um elemento móvel é considerado de pequeno porte quando G/F_u está em torno de 1,0 e de grande quando está próximo a 10,0.

Neste estudo são considerados as guias de escorregamento e de rolamento com coeficientes de fricção f_2 de 0,1 e 0,005, respectivamente. As conclusões a serem obtidas para as guias de rolamento são válidas também, sob o aspecto da eficiência mecânica, para as outras guias de baixo atrito, tais como as hidro e aerostáticas.

A figura 4 mostra o desenho esquemático de um sistema de avanço com fuso de movimento. Existem os seguintes tipos de fuso: escorregamento, rolamento e hidro e aerostático. Na presente análise são considerados apenas os dois primeiros. Contudo, as conclusões relacionadas ao fuso de rolamento são aplicáveis, também, para os fusos hidro e aerostáticos. Obviamente, estes últimos têm menor coeficiente de atrito.

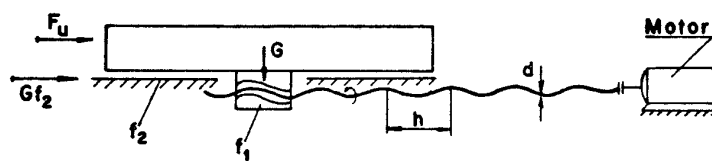


Figura 4. Sistema de avanço genérico com fuso de movimento.

Desprezando-se as perdas de energia no motor, o rendimento do sistema de avanço da figura 4 é dado pela seguinte expressão:

$$\eta = \frac{100}{1 + \frac{G}{F_u} f_2 + (1 + \frac{G}{F_u} f_2) f_1 \pi \frac{d}{h}} (\%) \quad (7)$$

onde f_1 é o coeficiente de fricção do par porca/fuso. Para o fuso de escorregamento foi assumido $f_1 = 0,1$ e para o de rolamento $f_1 = 0,005$. A razão d/h entre o diâmetro nominal do fuso d e o seu passo h varia na faixa de 2 a 20⁽⁶⁾.

A figura 5 mostra as curvas do rendimento η em função de G/F_u para $d/h = 5$ e diferentes tipos de fusos e guias. Baseado nessas curvas, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

1) Para valores de G/F_u em torno de 1,0 (elemento móvel pequeno), o fuso de rolamento tem bem maior influência no rendimento η do que a guia de rolamento. Isto é visto pela grande diferença entre os valores de η nas curvas "c" e "a" e também nas curvas "c" e "b", para G/F_u próximo a 1,0;

2) Para valores de G/F_u em torno de 10 (elemento móvel grande), a guia de rolamento tem uma maior influência no rendimento. Observe a grande diferença das curvas "d" e "c" para G/F_u em torno de 10. Por outro lado, a diferença entre as curvas "c" e "b" reduz bastante quando G/F_u cresce. Isto significa que a importância da guia de rolamento em relação ao fuso de rolamento cresce à medida que G/F_u aumenta.;

3) Em qualquer caso, o fuso de rolamento afeta substancialmente o rendimento do sistema de avanço. Veja, por exemplo, a grande diferença entre as curvas "d" e "b" em toda faixa de variação de G/F_u . Para valores de G/F_u em torno de 10, constata-se que a guia e o fuso de rolamento são indispensáveis. Assim, sob o aspecto da eficiência mecânica, em sistemas de avanço de máquinas cujo elemento móvel é grande, recomenda-se utilizar guia e fuso de baixo atrito (rolamento, hidro e aerostático);

4) Nesta análise não foram consideradas as forças externas verticais que as guias podem estar sujeitas, tais como, forças de corte e peso da peça de trabalho. Levando-se em conta tais forças, o rendimento η será menor que o dado pela equação (7). Tudo se passa como se o peso G do elemento móvel aumentasse, e em consequência, pela equação (7), o rendimento decresceria. Contudo, todas as conclusões acima continuam válidas.

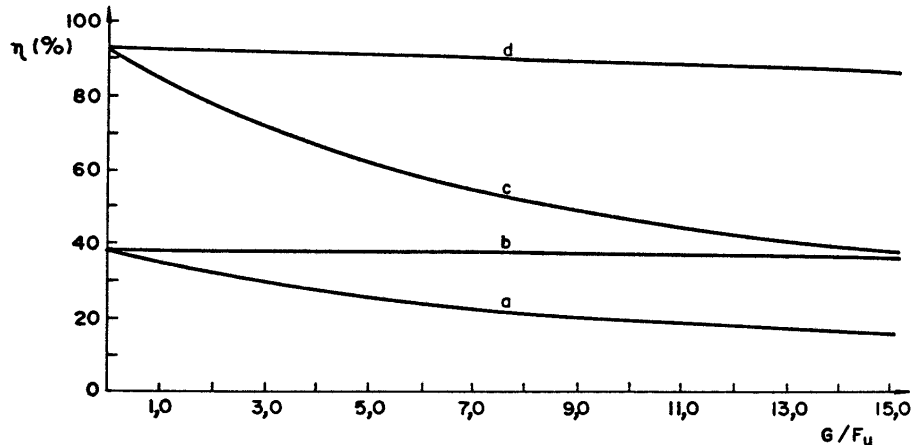


Figura 5. Rendimento η do sistema de avanço em função de G/F_u para $d/h = 5$ e os seguintes tipos de fusos e guias: (a) fuso de escor./guia de escor.; (b) fuso de escor./guia de rolam.; (c) fuso de rolam./guia de escor.; (d) fuso de rolam./guia de rolam.

8. CONCLUSÕES

1) A declividade positiva da curva "fricção x velocidade" da guia contribui para o amortecimento de vibrações. Ademais, esta característica evita o surgimento do efeito "stick-slip", que ocorre em guias de escorregamento (metal/metal) em velocidades muito baixas. Em guias de escorregamento e de rolamento, o amortecimento é nulo devido à fricção de Coulomb ou de rolamento para velocidades de avanço maior ou igual a máxima velocidade de vibração;

2) Os revestimentos plásticos aplicados em guias de escorregamento oferecem as seguintes vantagens: curva "f x v" com inclinação positiva; baixo nível de atrito e desgaste; baixo custo;

3) As guias de escorregamento (plástico/metal) são bem apropriadas para máquinas onde se necessita, prioritariamente, amortecer vibrações devidas às altas potências de corte⁽⁹⁾;

4) As guias hidrostáticas são bastante adequadas para máquinas de grande porte, onde se deseja alta capacidade de carga e rigidez e movimentos suaves com baixo atrito e sem desgaste;

5) As guias aerostáticas são bem apropriadas para sistemas de avanço com um ou mais dos seguintes requisitos operacionais: dilatações térmicas as mínimas possíveis, altíssimas precisão de posicionamento ou velocidade de translação;

6) As guias de rolamento são recomendadas, especialmente, onde se requer velocidades muito altas e baixo atrito. Apresentam alta rigidez, porém tem como principal desvantagem o baixo nível de amortecimento. Assim, não é aconselhável o seu uso em máquinas sujeitas a extremas vibrações;

7) No tocante à eficiência mecânica do sistema de avanço têm-se dois casos a considerar: elemento móvel de pequeno (a) e de grande (b) porte. No caso (a), a influência do fuso de rolamento no rendimento é bem maior do que a guia de rolamento. No caso (b), a guia de rolamento passa a ter mais importância no rendimento do que no caso (a).

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- JISHENG, E.; GAWNE, D. T. Tribological performance of bronze-filled PTFE facings for machine tool slideways. **Wear**, v. 176, n. 2, p. 195-205, 1994.

2. ERNST, P.; THEIMERT, P. H. Führungen für geradlinige bewegungen. **Werkstatt und Betrieb**, v. 110, n. 4, p. 203-212, 1977.
3. KOBAYASHI, T.; BURDEKIN, M. The effects of the damping characteristics of slideways on the dynamic characteristics of workpiece fixtures mounted on machine tool tables. **Proc. Instn. Mech. Engrs, Journal of Engineering Manufacture**, v. 208, n. B4, p. 245-251, 1994.
4. POLÁČEK, M.; VAVRA, Z. The influence of different types of guideways on the static and dynamic behaviour of feed drives. **Proc. of the 8th MTDR Conference**, 1967. p. 1127-1138.
5. HASHIZUME, H.; SHINNO, H. A study on nanometer positioning table system equipped with electrorheological fluid units. **JSME International Journal, Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing**, v. 43, n. 1, p. 183-189, 2000.
6. STUTE, G.; BÖBEL, K. H.; HESSELBACH, J.; HODEL, U.; STOF, P. **Electrical feed drives for machine tools**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1983. 363p.
7. BAUMGARTNER, H. Gedämpfte längsführungen mit wälzkörpern. **Werkstatt und Betrieb**, v. 110, n. 8, p. 529-531, 1977.
8. SALJÉ, E. Wirkungsgrad von vorschubantrieben für werkzeugmaschinen. **Wt - Z. Ind. Fertig.**, v. 61, n. 9, p. 548-549, 1971.
9. BATES, C. Applications show the way. **American Machinist**, v. 143, n. 1, p. 50-58, 1999.

APÊNDICE A - VELOCIDADES LINEARES DE MÁQUINAS-FERRAMENTA

Classificação das velocidades lineares de máquinas-ferramenta em operação de usinagem, ou seja, velocidade de avanço ou de corte.

Velocidades lineares	m/min
muito baixas	0 – 0,6
baixas	0,6 – 2,5
médias	2,5 – 10,0
altas	10,0 – 40,0
muito altas	> 40,0

A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE OPERATIONAL PERFORMANCE OF MACHINE TOOL GUIDEWAYS: PLAIN, ROLLING, HYDROSTATIC AND AEROSTATIC

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. *In this paper a comparative analysis is undertaken among the following types of machine tool guideways: plain, rolling, hydrostatic and aerostatic. This comparison is based on factors that affect their operational characteristics: friction, wear, load capacity, stiffness, damping and mechanical efficiency. The frictional behaviour of the guideways influences the rate of heat generation, speed range of operation, positioning accuracy and uniformity of motion of the moving element (table, etc). The types of wear that may occur on these guideways are also described. The tribological properties of the slideways can be improved by using plastics that have as a basis polytetrafluorethylene, epoxy, poliamide or acetal. The damping capability of the guideways is very important for the dynamic stability of the feed drives of the machine tools. Therefore, the vibrational damping physical mechanisms of the various types of guideways are studied. Finally, an analysis of the influence of the type of guideways on the efficiency of the feed drives is performed as a function of the size of the moving element and type of the lead screw used in the machine.*

Keywords: *machine tool guideways; plain slideway; rolling; hydrostatic; aerostatic.*