

UM ESTUDO SOBRE FENÔMENOS TRIBOLÓGICOS EM MANIPULADORES ROBÓTICOS

Alexandre Silva de Lima, alima@cefet-rj.br¹
Max Suell Dutra, max@mecanica.coppe.ufrj.br²
Armando Carlos de Pina Filho, pina-filho@deg.ee.ufrj.br³
Fabício Lopes e Silva, falopes@ufrj.br²

¹Centro Federal de Educação Tecnológica, CEFET-RJ, Departamento de Engenharia Industrial de Controle e Automação, CEP: 26041-271, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

²Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Mecânica, CEP: 21945-970, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

³Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Departamento de Expressão Gráfica, CEP: 21949-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

Resumo: *O atrito é um fenômeno complexo porque é composto de diversos fenômenos físicos combinados. Ele depende da geometria de contato entre as superfícies, da topologia das superfícies, das propriedades dos materiais em contato, da velocidade relativa das superfícies e da lubrificação. Nos servomecanismos, o atrito pode causar vibrações, conhecidas como stick-slip, que são movimentos intermitentes em baixas velocidades, ocasionando erros de trajetória. O atrito também causa desgaste no sistema. O objetivo do trabalho aqui apresentado é o estudo de fenômenos tribológicos, em particular, relacionados ao atrito de rolamento, os quais podem ocorrer em manipuladores robóticos. Considerando o manipulador do tipo antropomórfico, foi feita uma pesquisa baseada em juntas de rotação. As principais características do manipulador foram apresentadas, bem como um estudo detalhado do atrito de rolamento e todos os aspectos relacionados a esse fenômeno. Também foi proposto um modelo físico baseado no atrito de rolamento em juntas, objetivando a melhora de desempenho do manipulador, apresentando as seguintes vantagens: uma maior precisão no posicionamento e movimento do manipulador, e a minimização do desgaste de suas juntas. Apesar da dificuldade na avaliação do atrito de rolamento, a partir dessa pesquisa, juntamente com técnicas já utilizadas em outros trabalhos, torna-se possível elaborar sistemas de controle capazes de compensar a influência de fenômenos tribológicos em manipuladores robóticos.*

Palavras-chave: *atrito, robótica, tribologia.*

1. INTRODUÇÃO

Segundo Canudas *et al.* (1995), o atrito é um fenômeno complexo porque é composto de diversos fenômenos físicos combinados. Ele depende da geometria de contato entre as superfícies, da topologia das superfícies, das propriedades dos materiais em contato, da velocidade relativa das superfícies e da lubrificação (Dupont, 1994). Nos servomecanismos, o atrito pode causar vibrações, conhecidas como *stick-slip*, que são movimentos intermitentes em baixas velocidades, ocasionando erros de trajetória. O atrito também causa desgaste no sistema (Dupont e Dunlap, 1995).

Em relação aos manipuladores robóticos, um dos principais fenômenos tribológicos que ocorre é o chamado atrito de rolamento, que representa a resistência ao movimento quando um objeto rola sobre uma superfície em contato. Esse tipo de atrito pode ocorrer em dois casos distintos: quando o corpo rolante é irregular, como uma pedra, e quando o corpo tem uma superfície lisa com alta precisão geométrica. A resistência ao movimento não apresenta uma causa principal, mas é devida a uma combinação de causas, como o escorregamento na região de contato, perdas por histerese, além de outras perdas por atrito durante o rolamento.

Logo, o objetivo do trabalho aqui apresentado é o estudo desses fenômenos tribológicos, em particular, relacionados ao atrito de rolamento, os quais podem ocorrer em manipuladores robóticos. Diversas tarefas dos robôs, como precisão no posicionamento, mudança no sentido da velocidade, e a velocidade de movimentação, são influenciadas pelo atrito nas juntas (Canudas *et al.*, 1995). Como o manipulador antropomórfico é o mais utilizado em diversas áreas da robótica, tais como: na intervenção submarina, aplicações industriais, robótica cirúrgica,

entretenimento entre outras, esse tipo de manipulador foi escolhido como objeto de estudo. Com isso, toda a modelagem aqui apresentada está relacionada à chamada junta de rotação.

2. MANIPULADORES ROBÓTICOS

Os manipuladores robóticos consistem na combinação de elementos estruturais (elos), conectados entre si através de articulações (juntas) em uma cadeia cinemática, sendo o primeiro corpo chamado de base e o último de extremidade terminal, onde será vinculado o componente efetuator, que pode ser uma garra ou uma ferramenta, como pode ser visto na Fig. (1).

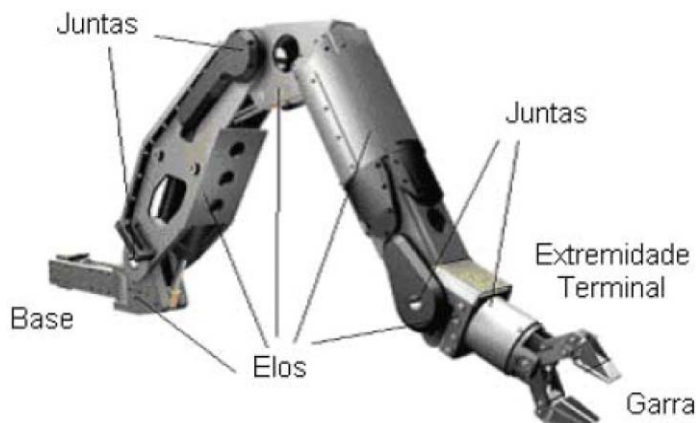


Figura 1. Exemplo de manipulador robótico (Lima, 2005).

As juntas podem ser de rotação, permitindo apenas rotação relativa entre dois elos, representadas pela letra R, ou prismáticas, que permitem apenas a translação linear, simbolizadas pela inicial P.

De acordo com a combinação das juntas de rotação e prismáticas, pode-se classificar os principais tipos de manipuladores como: antropomórfico (RRR), esférico (RRP), SCARA (RRP), cilíndrico (RPP) e cartesiano (PPP).

2.1. Manipulador Antropomórfico

O arranjo de um manipulador antropomórfico típico permite três movimentos do braço (rotação do ombro, elevação do ombro e rotação do cotovelo), três movimentos do pulso (roll, pitch e yaw) e o movimento de abrir e fechar a garra.

Para analisar o atrito na junta de rotação, foi necessário estudar as suas características construtivas.

Através do esquema da junta de rotação do robô antropomórfico (Fig. (2)) podemos identificar o uso de rolamento de esferas para permitir o seu movimento rotacional.

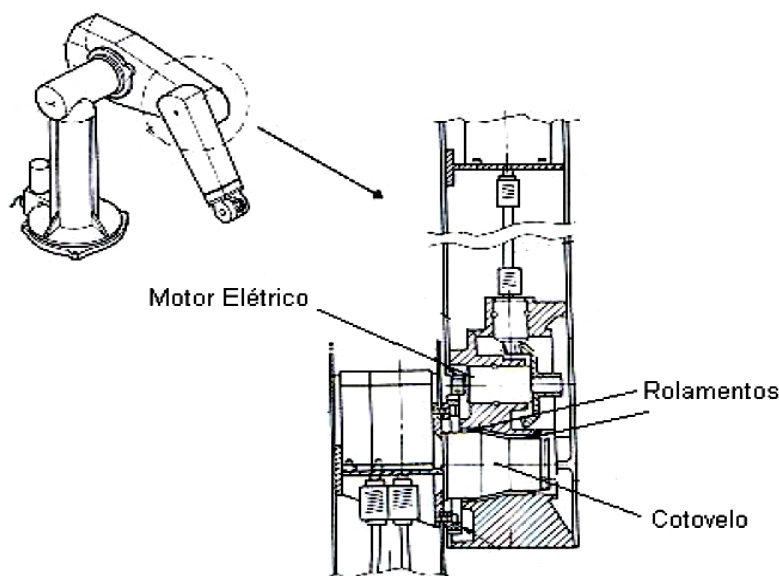


Figura 2. Junta de rotação do robô (Rivin, 1987).

O tipo de rolamento mais empregado nas juntas de rotação dos robôs é o denominado como rolamento de seção fina. Ele possui anéis bem finos, uma seção transversal pequena e são caracterizados pelo baixo peso, baixo atrito e alta rigidez. Os rolamentos de seção fina além dos robôs também são utilizados em máquinas têxteis, impressoras e mesas giratórias de ferramentas de usinagem.

3. FENÔMENOS TRIBOLÓGICOS

Como visto anteriormente, o atrito de rolamento pode estar relacionado a uma série de fenômenos, os quais serão discutidos nessa seção.

3.1. Escorregamento na Região de Contato

Se o contato de dois corpos (uma esfera em uma superfície plana) fosse um ponto, poderia ser considerada a ocorrência de rolamento puro. Na prática a região de contato é deformada elasticamente, e em casos extremos plasticamente, de modo que o contato é feito sobre uma área, com pontos dispostos em diferentes planos (Stoeterau, 2004). Em consequência, o rolamento puro somente ocorre para um número muito pequeno de pontos, com todos os outros submetidos a uma combinação de rolamentos, e um pequeno escorregamento. Para que esse escorregamento ocorra é necessário vencer uma resistência a ele imposta na interface, o que corresponde a um aumento da força de atrito por rolamento.

Embora a velocidade de escorregamento seja normalmente pequena (cerca de 5% ou menos da velocidade de rolamento). Esse pequeno escorregamento é o responsável, em muitos casos, pela maior parcela da resistência total ao rolamento.

De acordo com a Fig. (3) pode-se notar a existência de regiões onde ocorre o escorregamento para frente e para trás.

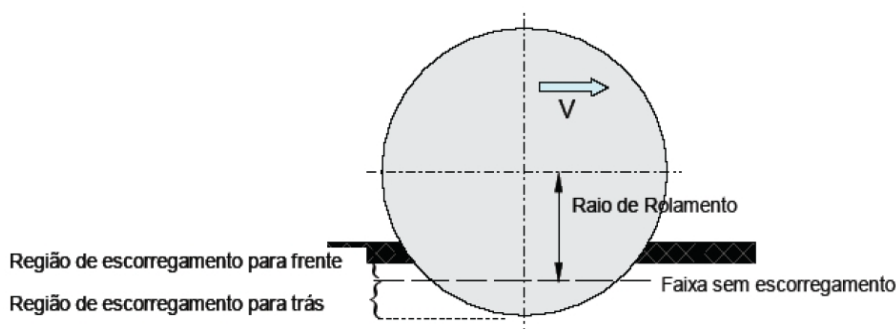


Figura 3. Regiões de rolamento em uma esfera sobre uma superfície plana (Stoeterau, 2004).

Em certos sistemas onde ocorre contato por rolamento (como mancais de rolamento e dentes de engrenagens), além do contato real em uma área estendida, ocorrem fatores que tendem a produzir escorregamento na região de contato, aumentando o coeficiente de atrito. Em alguns casos a superfície rolante gira em relação à região de contato (efeito giroscópio), em outros ocorre grande escorregamento (dentes de engrenagens). Nestes casos o coeficiente de atrito por rolamento pode ser grande, com valores maiores que 10^{-3} .

3.2. Perdas por Histerese

Durante o rolamento, diferentes regiões das superfícies em contato são tensionadas, desaparecendo essas tensões quando o ponto de contato se desloca. Quando um elemento de volume, em cada corpo, é tensionado, acumula energia elástica. Quando as tensões desaparecem, grande parte dessa energia é liberada para o sistema, mas uma pequena parte é perdida na forma de calor, ocasionando a histerese elástica do material. Essa perda continuada de energia corresponde a um aumento na resistência ao rolamento, somando mais uma componente ao coeficiente de atrito por rolamento. Essa componente devido à histerese no coeficiente de atrito por rolamento total é pequena em algumas situações, ou seja, menor que 10^{-4} , mas é predominante na maioria dos casos de rolamento.

3.3. Temperatura na Superfície de Escorregamento

Para se ter um deslocamento relativo entre as superfícies em contato de dois corpos, deve-se aplicar uma força o suficientemente grande para vencer a resistência de atrito. Com a continuidade do escorregamento, essa força deve ser mantida e, desse modo, é injetada energia no sistema. Essa energia é utilizada de vários modos, entre os quais podemos citar a deformação elástica dos corpos em contato e seus suportes, a deformação elástica e plástica das asperezas nos pontos de contato, a formação de partículas de desgaste e a emissão de energia acústica e calor. Na maioria dos casos,

uma alta porcentagem da energia total fornecida é transformada em calor na interface dos corpos em contato, elevando assim a temperatura no contato.

Na maioria das situações em que ocorre escorregamento, o contato não ocorre em toda a área aparente, mas sim em algumas poucas partes isoladas. Como elas são pequenas e recebem valores substanciais de energia térmica, sua temperatura é mais elevada do que nas regiões superficiais vizinhas onde não ocorre o contato. Essa alta temperatura é chamada de “temperatura momentânea” (*flash temperature*).

A geração de calor e elevação da temperatura durante o escorregamento são importantes por uma série de razões. Em muitos casos, a resistência mecânica de um dos materiais em contato diminui drasticamente com a elevação da temperatura e é importante calcular a temperatura durante o escorregamento para verificar se ela atinge valores críticos nas condições de operação do sistema. Em outras ocasiões, utiliza-se um lubrificante que funciona em determinadas faixas de temperaturas, ou mesmo, se decompõe ao ser atingido um valor de temperatura.

É importante salientar que não é fácil definir a temperatura de uma superfície resultante do calor gerado no atrito, porque essa pode variar bastante em diferentes pontos da superfície. Entretanto, assumindo simplificações e utilizando modelos também simplificados, pode-se prever a ordem de grandeza da temperatura atingida durante o escorregamento e definir quais variáveis do sistema influem na temperatura superficial.

O primeiro tipo de sistema a ser considerado é o caso uniaxial, representado, por exemplo, pelo escorregamento entre dois tubos que giram em contato de topo, um contra o outro, como é mostrado na Fig. (4).

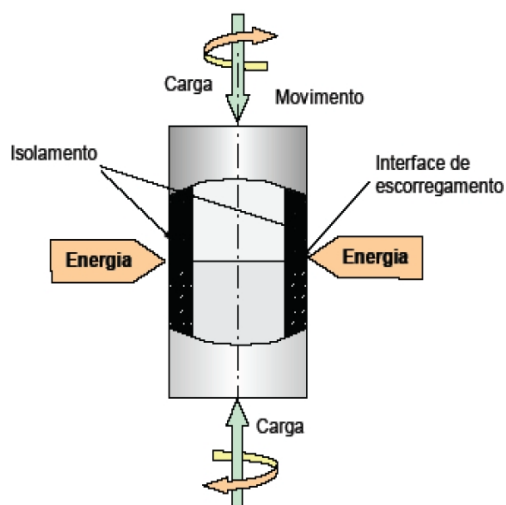


Figura 4. Rotação de cilindros em contato (Stoeterau, 2004).

O segundo tipo de sistema é o de um corpo em contato com outro em uma área limitada e movimentando-se sobre sua superfície de modo que a mesma região do primeiro corpo entra em contato com diferentes regiões do segundo. Este sistema difere do anterior porque é atingida uma distribuição uniforme de temperatura no primeiro corpo, enquanto o corpo com área de contato limitada é refrigerado pelas regiões frias do corpo maior. Considera-se o caso bastante simplificado em que o contato consiste de uma junção circular de $\varnothing = 2r$ escorregando em uma superfície plana de outro material com velocidade moderada, como é observado na Fig. (5).

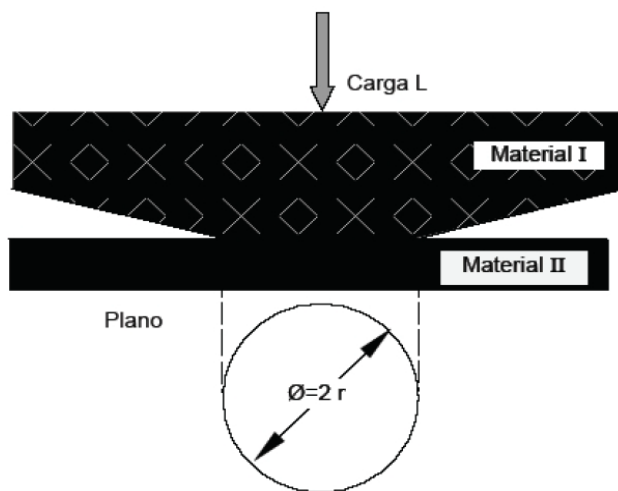


Figura 5. Modelo de junção entre dois materiais (Stoeterau, 2004).

3.4. Stick-Slip

O escorregamento de um corpo sobre outro pela ação de uma força constante ocorre algumas vezes em velocidade constante, ou aproximadamente constante, e outras em velocidades que variam. Na maioria dos sistemas, essa variação da velocidade de escorregamento é um sério problema e, portanto, são procuradas medidas para eliminar ou mesmo reduzir a amplitude dessas variações.

Todo processo de *stick-slip* é ocasionado por uma inconstância da força de atrito motivada por outras variáveis, tais como: distância, tempo e velocidade.

Considere a Fig. (6), a qual representa uma situação típica de escorregamento envolvendo um corpo (chamado cursor) fixado a um suporte estacionário através de uma mola, e outro (uma placa) em movimento com uma velocidade constante V .

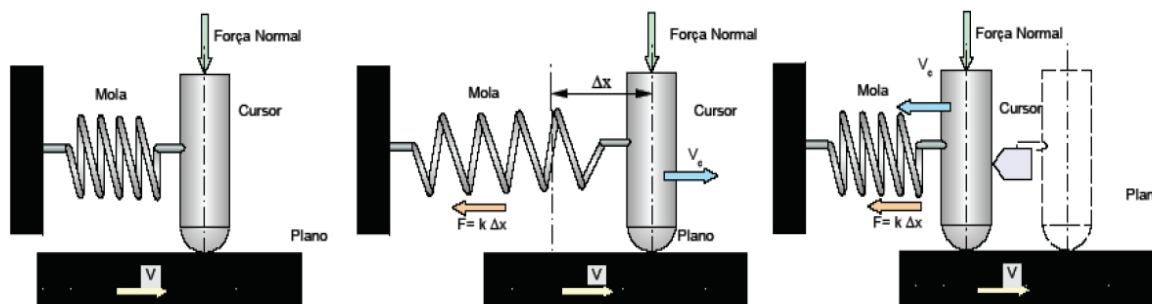


Figura 6. Representação de um sistema de atrito típico (Stoeterau, 2004).

Neste caso considerando que a velocidade é suficientemente baixa de tal modo que o cursor não apresente dificuldade em acompanhar o movimento da placa, e que o amortecimento seja desprezível, o gráfico da força de atrito em função do deslocamento do cursor na placa é mostrado na Fig. (7).

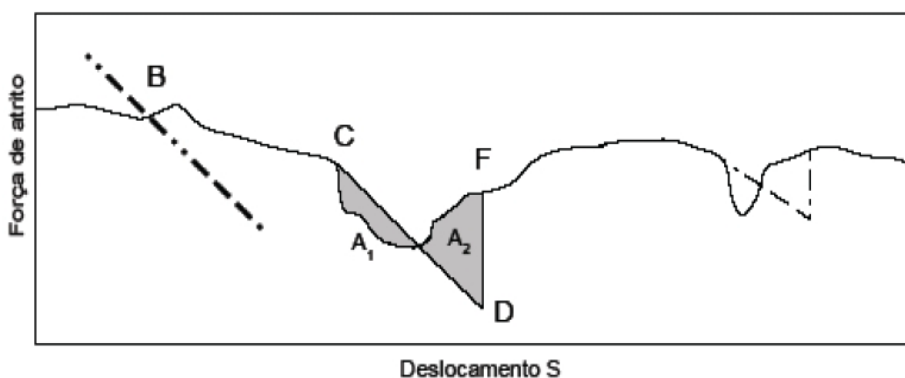


Figura 7. Gráfico da Força x Deslocamento (Stoeterau, 2004).

Como este é um gráfico *Força versus Deslocamento*, pode-se indicar no mesmo diagrama a função *Força versus Deslocamento da Mola*, a qual será uma linha reta com inclinação K através do ponto representativo de qualquer posição do cursor. Se o movimento inicia em B , o cursor se deslocará sobre a placa com velocidade constante até o ponto C ser atingido. Nesse ponto a força acumulada na mola é superior à força de atrito e, por sua ação, o cursor escorrega (*slip*) até o ponto D , devido à força de atrito ter caído bruscamente.

Nesse ponto, a área A_2 (força de atrito e deslocamento do cursor) é igual à área A_1 (energia de deformação acumulada na mola e transformada em energia cinética do cursor). Como a energia cinética foi totalmente usada, a força da mola é bem inferior à força de atrito, e o cursor para (*stick*) em relação à placa e é arrastado por ela até que a força de mola, igualando-se à força de atrito, faça o movimento relativo reiniciar.

Um comportamento desse tipo é chamado *stick-slip irregular*, e é ocasionado pela inconstância da força de atrito. Este fenômeno ocorre em superfícies metálicas cobertas por um filme lubrificante que pode ter sido parcialmente expulso. A flutuação ocorre porque o cursor atravessa regiões cobertas pelo filme lubrificante e regiões sem o filme.

Se a mola for construída com uma rigidez tal que sua inclinação na Fig. (8) seja maior que a máxima inclinação do gráfico *Força de atrito versus Deslocamento*, o *stick-slip irregular* será evitado.

Além do *stick-slip irregular*, existe também o *stick-slip regular*, que é considerado a forma clássica do *stick-slip* e ocorre sempre que o coeficiente de atrito estático é bem maior que o coeficiente dinâmico. Considere uma situação de

escorregamento em que a placa da Fig. (6) tem uma velocidade baixa quando comparada à máxima velocidade do cursor durante o escorregamento e que o amortecimento externo é desprezível. Esse modelo simples pode ser usado para explicar o *stick-slip regular*. Assumindo que o coeficiente de atrito estático é definido em função do tempo de contato, apresentando um comportamento como o mostrado na Fig. (8), onde o coeficiente dinâmico permanece constante.

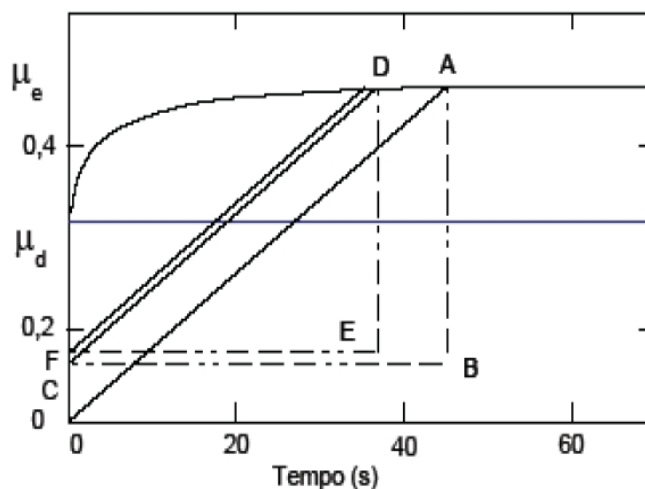


Figura 8. Coeficiente estático em função do tempo de repouso (Stoeterau, 2004).

Movimentando a placa com a velocidade V , a força de mola cresce com o tempo na razão kVt , o que pode ser registrado na Fig. (8) como uma reta a partir da origem, com inclinação kV/L . A energia elástica se acumula na mola mas a força da mola é insuficiente para vencer a força de atrito e o cursor permanece parado em relação à placa. Ao atingir o ponto A , ocorre escorregamento, a energia da mola é liberada e, como $\mu_d < \mu_e$ o escorregamento continua até o ponto B , situado a uma distância de reta de μ_d igual a constate igual ao do ponto A . A situação de equilíbrio, que ocorreria para força da mola igual a μ_d . A constante L foi ultrapassada e o cursor para, o que foi representado no gráfico com o ponto C (a força da mola não é nula). Continuando o deslocamento da placa, um novo ciclo inicia e somente ocorrerá escorregamento em D , pois o cursor está parado e $\mu_e > \mu_d$. Finalmente, um estado de equilíbrio é alcançado. Aumentando V ou k as linhas terão uma inclinação maior e o *stick-slip* terá uma amplitude menor.

3.5. Outras Perdas por Atrito Durante o Rolamento

Primeiro pode-se citar a perda de energia causada pela falta de perfeição na geometria do corpo rolante, por exemplo, imprecisão na forma esférica dos corpos rolantes de um mancal de rolamento, ou a presença de uma partícula de poeira na pista de rolamento. Isto ocasionaria uma componente de atrito devido à rugosidade.

Segundo, a perda de energia causada por deformação plástica das asperezas da superfície de rolamento, já que essas superfícies não são perfeitamente lisas. O mesmo ocorre com partículas contaminantes pressionadas entre as superfícies rolantes.

Por último, existem perdas de energia por escorregamento existentes na interface dos corpos rolantes e dos espaçadores (porta-esferas e porta-rolos em mancais) e perdas devido à viscosidade do óleo ou da graxa presente. Todas essas perdas correspondem a uma componente da força de atrito com uma magnitude da ordem de 10^{-4} .

4. MODELAGEM DO ATRITO

Em relação à modelagem do atrito, algumas definições são importantes (Dupont, 1994 e Canudas *et al.*, 1995), dentre elas destacam-se:

- Atrito estático é a força necessária para iniciar o movimento a partir do repouso;
- Atrito de *Coulomb* é a componente do atrito a qual não depende do valor da velocidade;
- No atrito viscoso a velocidade depende do atrito;
- Efeito *Dahl* é a deformação elástica da rugosidade da junção que se comporta como uma mola linear para pequenos deslocamentos;
- *Break-away force* é a força necessária para vencer o atrito estático;
- *Stribeck* é o fenômeno de diminuição do atrito devido ao aumento da velocidade em velocidades baixas;
- Memória de atrito é o retardo entre mudanças nos valores da velocidade e da força de atrito.

Os modelos clássicos do atrito são descritos pelo mapa estático que relacionam a velocidade e a força de atrito. Os exemplos típicos são combinações do atrito de *Coulomb*, do atrito viscoso, do atrito estático e do *Stribeck*, como é mostrado na Fig. (9).

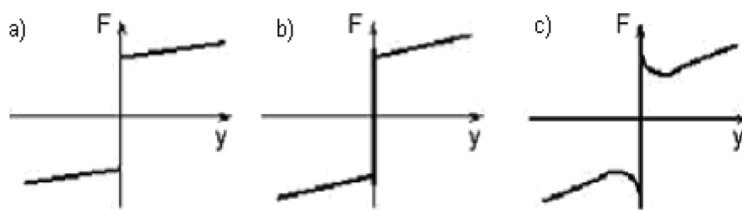


Figura 9. Modelo estático do atrito: a) *Coulomb*, b) atrito estático, e c) *Stribeck* (Gomes, 1995).

O modelo do atrito de *Coulomb* é uma clássica modelagem estática. Entretanto esta modelagem se mostrou inadequada para a análise e a simulação de sistemas em malha fechada por causa das descontinuidades devido às velocidades nulas (Gomes, 1995).

O modelo estático não abrange fenômenos como a histerese, o efeito *Dahl* e as variações da *break-way force* (Dupont, 1994). Para isso um modelo de atrito que envolve a dinâmica é necessário para descrever exatamente esses fenômenos.

Como exemplo de modelagem foi usado o modelo estático dado pela equação (Sprenger *et al.*, 1997):

$$F = offset + sign(\dot{\theta}) \cdot (a + b \cdot |\dot{\theta}|) \cdot (1 - e^{-V \cdot |\dot{\theta}|}) \quad (1)$$

Onde: *offset* é para o coeficiente de atrito, *a* é o atrito de *Coulomb*, *b* é o atrito viscoso e *V* é o *Stribeck*. Todos esses parâmetros podem ser encontrados em manuais de manipuladores.

Essa formulação possui um termo exponencial para considerar *Stribeck*, e evitar descontinuidades para velocidades nulas. Este modelo é uma extensão do modelo clássico de *Coulomb*. A equação a seguir descreve a modelagem dinâmica do manipulador robótico (Asada e Slotine, 1986):

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + N(\theta, \dot{\theta}) = u \quad (2)$$

Onde: θ é o vetor dos ângulos das juntas, M é a matriz de inércia simétrica e positiva, $C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$ é o vetor dos termos centrífugos e de *Coriolis*, $N(\theta, \dot{\theta})$ é o termo da força gravitacional e da força de atrito, e u é a força de controle aplicada.

Este modelo de atrito, definido pelas equações anteriormente apresentadas, será adicionado à lei de controle do mecanismo. Isso representa uma das estratégias de controle que tentam compensar o atrito, sem recorrer ao controle com ganho elevado. Também é possível utilizar um controle adaptativo (Canudas e Lischinsky, 1997). De qualquer forma, o estudo do controle do atrito representa uma tarefa difícil, devido ao atrito depender da máquina e da tarefa a ser executada (Dupont e Dunlap, 1995).

5. CONCLUSÃO

O trabalho aqui apresentado mostra como o desempenho de um manipulador robótico (do ponto de vista de trajetória) pode ser melhorado através da inclusão de um modelo físico baseado no atrito de rolamento em juntas. Esse tipo de atrito é muito difícil de ser avaliado, mas através de algumas técnicas já utilizadas em diversos trabalhos de pesquisa torna-se possível, além do seu estudo, elaborar sistemas de controle capazes de compensar a sua influência nos manipuladores robóticos.

Outros fenômenos associados ao atrito de rolamento, como temperatura superficial e o efeito *stick-slip* têm que ser levados em consideração em estudos dos atritos nas juntas robóticas.

As vantagens desse tipo de estudo são: uma precisão maior no posicionamento e movimento do manipulador robótico, e a minimização do desgaste das suas juntas.

6. REFERÊNCIAS

- Asada, H. e Slotine, J.E., 1986, "Robot Analysis and Control", Ed. Jonh Willey and Sons, New York.
- Canudas, C. e Lischinsky, P., 1997, "Adaptive friction compensation with partially knowing of model", International Journal of Adaptive Control, v. 11, p. 65-80.
- Canudas, C., Olsson, H., Aström, K.J. e Lischinsky, P., 1995, "A new model for control of systems with friction", IEEE Transactions on Automatic Control, v. 40, n. 3, p. 419-425.
- Dupont, P.E., 1994, "Avoiding stick-slip through PD control", IEEE Transactions on Automatic Control. v. 39, n. 5, p. 1094-1097.

- Dupont, P.E. e Dunlap, E.P., 1995, "Friction modeling and PD compensation at very low velocities", Transactions of the ASME, v. 117, p. 8-14.
- Gomes, S.C.P., 1995, "Modelagem de atritos internos às articulações de robôs manipuladores", Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, Brasil.
- Lima, A.S., 2005, "Concatenação dos Movimentos do Manipulador e da Câmera de um ROV", Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Rivin, E.I., 1987, "Mechanical Design of Robots", Ed. McGrawHill, New York.
- Sprenger, B., Kucera, L. e Mourad, S., 1997, "Balancing of an inverted pendulum with a scara robot", IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Tokyo.
- Stoeterau, R.L., 2004, "Apostila de Tribologia", UFSC, Brasil.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

STUDY OF TRIBOLOGIC PHENOMENA IN ROBOTIC MANIPULATORS

Alexandre Silva de Lima, alima@cefet-rj.br¹
Max Suell Dutra, max@mecanica.coppe.ufrj.br²
Armando Carlos de Pina Filho, pina-filho@deg.ee.ufrj.br³
Fabrício Lopes e Silva, falopes@ufrj.br²

¹Federal Center of Technological Education, CEFET-RJ, Department of Automation and Control Engineering, CEP: 26041-271, Rio de Janeiro/RJ, Brazil.

²Federal University of Rio de Janeiro, COPPE, Program of Mechanical Engineering, 21945-970, Rio de Janeiro/RJ, Brazil.

³Federal University of Rio de Janeiro, POLI, Department of Graphical Engineering, 21949-900, Rio de Janeiro/RJ, Brazil.

Abstract. Friction is a complex phenomenon because is composed by diverse combined physical phenomena. It depends of the contact geometry between surfaces, surfaces topology, materials properties in contact, relative velocity of the surfaces, and lubrication. In servomechanisms, friction can cause vibration, knowing as stick-slip, which are intermittent movements in low velocities, causing trajectory errors. Friction can cause system wear too. The objective of the work presented here is the study of tribologic phenomena, in particular, related to rolling friction, which can occur in robotic manipulators. Taking into consideration the manipulator of the antropomorphic type, a research based on rotation joints was made. The main characteristics of the manipulator were presented, as well as a detailed study of the rolling friction and all aspects related to this phenomenon. Also a physical model based in the rolling friction in joints was proposed, objectifying the improvement of performance of the manipulator, presenting the following advantages: a bigger precision in the positioning and movement of the manipulator, and the minimization of the wear of its joints. In spite of the difficulty in the evaluation of the rolling friction, from this research, together with techniques already used in other works, to elaborate control systems capable to compensate the influence of tribologic phenomena in robotic manipulators become possible.

Keywords: friction, robotics, tribology.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.