



## ESTUDO DA ESTABILIDADE NO CONTATO ENTRE O PÉ E O SOLO DURANTE A LOCOMOÇÃO BÍPEDE

### Max Suell Dutra

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, COPPE/PEM, C.P. 68503 - CEP. 21945-970, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

E-mail: max@serv.com.ufrj.br

### Armando Carlos de Pina Filho

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, COPPE/PEM, C.P. 68503 - CEP. 21945-970, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

E-mail: pina-filho@bol.com.br

**Resumo.** Manter a estabilidade do corpo durante a realização de um passo é um dos principais problemas relacionados à locomoção bípede. Um dos fatores a ser analisado é o centro de massa do sistema. Existe a necessidade de uma análise detalhada da distribuição de massa e do “deslocamento” do centro de massa do corpo. Outro ponto importante é o estudo da estabilidade no contato entre o pé e o solo. O locomotor deve estar apto a realizar a locomoção em diversas superfícies, sejam elas de formas ou materiais diferentes, mantendo a estabilidade durante o movimento e até mesmo recuperando essa estabilidade no caso de uma perturbação, como por exemplo, um tropeção. O trabalho aqui apresentado tem por objetivo avaliar os diversos fatores ligados ao estudo da estabilidade e do atrito, tais como: os modos de andar e as forças de reação do pé com o solo, as possíveis estratégias para evitar o escorregamento e possibilitar a realização de passos, a utilização de equipamentos específicos para medição do atrito no contato entre o pé e o solo, etc. Os resultados da pesquisa poderão ajudar na determinação de modos de andar estáveis, possibilitando o desenvolvimento de mecanismos de controle para locomotores bípedes.

**Palavras-chave:** Atrito, Estabilidade, Locomoção, Tribômetro.

### 1. INTRODUÇÃO

A perda da estabilidade do equilíbrio durante a locomoção bípede e conseqüente queda do indivíduo representa um dos principais problemas causadores de ferimentos acidentais, sendo responsável por muitos danos nas costas, torceduras e fraturas. Atualmente existe um grande investimento em pesquisas para evitar acidentes com pessoas que sofrem quedas, seja apenas caminhando ou no ambiente de trabalho. Além disso, graças à crescente susceptibilidade à perda de equilíbrio, as quedas são a principal causa de morte em cidadãos idosos. Estima-se que um terço das pessoas com mais de 65 anos sofrem uma ou mais quedas todo ano (Pijnappels *et al.*, 2001). Quedas causadas por escorregamento constituem a maior classe de acidentes de quedas em pedestres. Mais de 25% das fraturas na bacia em pessoas idosas estão relacionadas a quedas causadas por escorregamento, e 66% dessas quedas ocorreu em superfícies molhadas ou escorregadias (Brady *et al.*, 2000).

Além do escorregamento, outro problema que pode levar à instabilidade é a presença de algum obstáculo na superfície de locomoção. Nesse caso o indivíduo pode sofrer um tropeção e cair. Em ambos os casos, escorregamento ou tropeção, é possível restaurar a estabilidade do corpo. A restauração do equilíbrio após o escorregamento ou tropeção é usualmente alcançada por complexos

mecanismos de controle neural e motor. A habilidade de uma pessoa para restaurar o equilíbrio durante uma queda iminente é largamente baseada em como tal pessoa negocia várias restrições que surgem de origens fisiológicas, anatômicas e ambientais. A estabilidade pode ser restaurada dependendo da força muscular, tamanho da base de suporte e forças de contato com o solo.

Para prevenir o escorregamento ou restaurar a estabilidade do equilíbrio caso ele aconteça (ou um tropeção) é preciso entender como tais fenômenos ocorrem. Para entender esses fenômenos é necessário avaliar uma série de fatores ligados ao estudo da estabilidade e do atrito, tais como: o movimento dos pés e as forças de reação com o solo, as possíveis estratégias para evitar o escorregamento e possibilitar a realização de passos, a utilização de equipamentos específicos para medição do atrito no contato entre o pé e o solo, etc. Este trabalho tem por objetivo analisar alguns desses fatores.

## 2. MODOS DE ANDAR

Para analisar o problema do escorregamento no contato do pé com o solo, bem como estudar a perda de estabilidade durante a locomoção, é preciso conhecer o modo de andar natural do ser humano. O modo de andar consiste de duas fases (Fig. (1)):

- Fase de suporte simples (ou fase de balanço): durante esta fase uma das pernas realiza o movimento de balanço enquanto a outra é responsável pelo apoio.
- Fase de suporte duplo: está é a fase onde ocorre a transição das pernas, ou seja, a perna em balanço torna-se perna de apoio e a outra inicia o movimento de balanço. Essa fase ocorre instantaneamente quando a perna em balanço toca o solo e a perna que antes era de apoio deixa o solo. Como será visto mais adiante, essa é a fase mais importante que deve ser considerada no estudo do escorregamento.

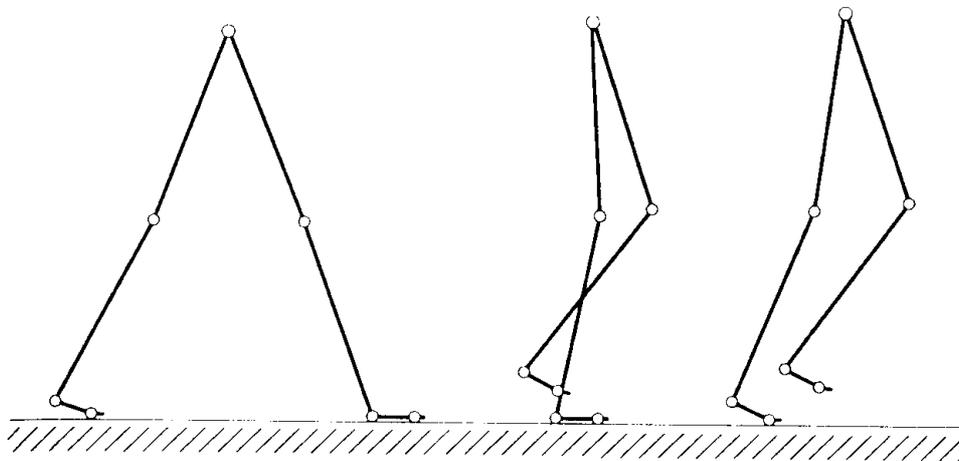


Figura 1. Movimentação das pernas, mostrando as fases de suporte duplo e simples (Dutra, 1995).

De acordo com os parâmetros espaciais-temporais de locomoção a cada passo, pode-se definir alguns tipos de modos de andar existentes:

- Modo de andar simétrico: O modo de andar é simétrico se dois passos consecutivos são idênticos, isto é, todos os parâmetros espaciais-temporais repetem-se exatamente em cada passo. Quando um modo de andar não possui essa propriedade ele é dito assimétrico.
- Modo de andar periódico: O modo de andar é periódico se todos os parâmetros espaciais-temporais se repetem após  $p$  passos. No caso do modo de andar ser simétrico  $p = 1$ . No caso de um modo de andar  $p$ -periódico, o ciclo do modo de andar consiste de  $p$  passos sucessivos.

- Modo de andar estável: Pela combinação de certos parâmetros, os ciclos limites do modo de andar são estáveis em relação às pequenas perturbações. Isso configura o modo de andar estável. Do contrário, tem-se o modo de andar instável.
- Modo de andar caótico: Um modo de andar caótico é caracterizado por sua total aperiodicidade. Todos os aspectos do regime caótico discutidos na literatura de sistemas dinâmicos não-lineares são diretamente aplicáveis para um robô bípede.

### 3. ESTABILIDADE DO EQUILÍBRIO

A locomoção humana representa uma tarefa de controle motor extremamente complexa. O controle do equilíbrio durante essa tarefa é especialmente desafiador. Os seres humanos são bípedes que, durante o modo de andar natural, permanecem 80% do seu tempo sobre uma das pernas, enquanto o restante do ciclo do modo de andar é de certa forma utilizado para restaurar o equilíbrio, possibilitando a próxima fase de balanço da perna (You *et al.*, 2001).

Ao realizar a locomoção deve-se manter a estabilidade (ou equilíbrio) do corpo, principalmente durante a fase de suporte simples. Para manter tal estabilidade o ser humano “desloca” o centro de massa corporal com o objetivo de manter o peso do corpo sobre a perna de suporte, enquanto a outra perna realiza o movimento de balanço. Para entender melhor o problema da instabilidade causada por escorregamentos ou tropeções devemos conhecer o conceito básico de estabilidade do equilíbrio.

Considere as três hastes uniformes de comprimento  $2a$  e peso  $W$ , representadas na Fig. (2). Embora cada haste esteja em equilíbrio, existe uma diferença importante entre os três casos considerados. Se cada haste for afastada de sua posição de equilíbrio e então abandonada: a haste (a) se moverá de volta à posição de origem, a haste (b) continuará afastando-se de sua posição original e a haste (c) permanecerá em sua nova posição. No caso (a), o equilíbrio da haste é estável; no caso (b), instável; no caso (c), indiferente.

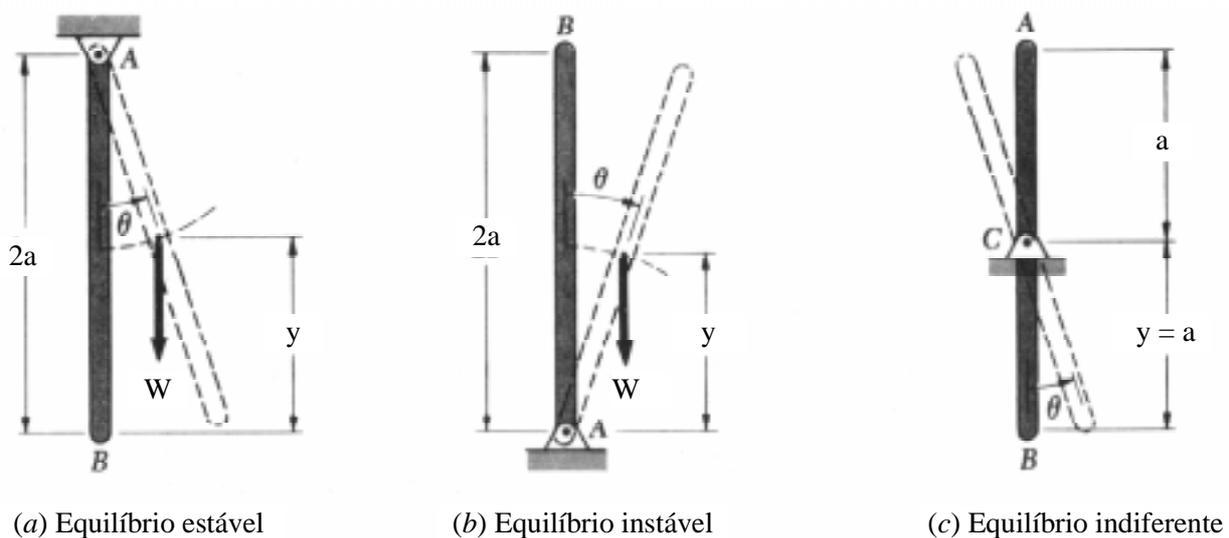


Figura 2. Três casos de equilíbrio considerados (Beer & Johnston Jr., 1990).

Como a energia potencial gravitacional é igual a  $Wy$ , onde  $y$  é a altura do ponto de aplicação de  $W$ , medida a partir de um nível arbitrário, observa-se que a energia potencial da haste (a) é mínima na posição de equilíbrio considerada, que a energia potencial de (b) é máxima e que a energia potencial da haste (c) é constante. Assim, o equilíbrio é estável, instável ou indiferente, conforme a energia potencial seja mínima, máxima ou constante.

O caso apresentado anteriormente é muito simples. O problema de estabilidade envolvido na locomoção é muito mais complexo, pois possui um número muito maior de graus de liberdade e,

além do problema da estabilidade de pontos fixos, existe a preocupação com a estabilidade da trajetória realizada pelas pernas durante o passo. Uma análise numérica do problema a partir da formulação e consideração do atrito é bastante complicada, particularmente considerando o problema do atrito entre o pé e o solo. Nesse caso, pelo menos uma das superfícies (a planta do pé) sofre deformação elástica. Isso complica a análise do atrito uma vez que não podemos assumir que o mesmo seja independente da velocidade, pressão, tempo, dentre outros fatores. Desta forma o atrito torna-se mais do que uma simples propriedade dos materiais. Não será feita nenhuma análise desse tipo neste trabalho, mas um bom exemplo de análise pode ser visto em Rice *et al.* (2001).

#### 4. O PROBLEMA DO ESCORREGAMENTO

É importante entender a forma de locomoção dos humanos e que o modo de andar tem relação com o escorregamento. O modo de andar bípede não é estaticamente estável, ou seja, se um pedestre for parado (congelado) no meio de um passo, ele poderá muito bem cair. Especificamente, a porção estável do modo de andar ocorre quando o corpo está apoiado sobre as duas pernas (fase de suporte duplo); o modo de andar é estaticamente instável quando o corpo está apoiado sobre um dos pés (fase de balanço da perna). O escorregamento pode ocorrer numa das duas transições entre as fases de suporte duplo e simples: ou quando o calcanhar da perna em balanço toca o solo ou no momento em que ocorre o impulso do pé para o balanço da perna. Interessantemente, enquanto o atrito deve ser alto para iniciar o balanço da perna, ele é bem reduzido quando o pé da perna em balanço toca o solo, o que pode fazer com que o corpo do pedestre mova-se para uma posição instável e que não seja possível recuperar a estabilidade. Essa primeira etapa do suporte duplo é particularmente arriscada porque o peso do corpo esta transferindo-se para o pé que pode vir a escorregar. Já na segunda etapa, devido ao requerimento de atrito ser alto para iniciar a fase de balanço e o fato do escorregamento nessa situação geralmente não resultar em queda, esse escorregamento fornece ao pedestre um tipo de “sistema de aviso” para moderar o modo de andar nestas condições de superfície (Marpet, 2001). Nesse caso as pessoas alteram seu modo de andar, encurtando o comprimento de suas passadas para otimizar o equilíbrio.

#### 5. ATRITO REQUERIDO X ATRITO EXISTENTE

O pedestre escolhe o modo de andar em função da superfície sobre a qual pretende andar. Esse mecanismo de escolha é tipicamente consumado inconscientemente. Especificamente, o modo de andar em certo instante requer um certo atrito para evitar o escorregamento. Se esse atrito existe entre o solo e a planta do pé, não ocorrerá escorregamento. Um indivíduo se locomovendo sobre determinada superfície aplica na zona de contato entre o pé e o solo uma força  $F_M$  que varia em amplitude e direção em função do tempo (Fig. (3)).  $F_M$  tem duas componentes:  $T$ , que está situada no plano da superfície, e  $N$  que é ortogonal a este plano. Uma reação  $F_R$  é oposta a força  $F_M$ , e suas componentes  $T'$  e  $N'$  são opostas, respectivamente, a  $T$  e  $N$ . A força  $T$  tende a fazer com que o pé escorregue sobre a superfície, enquanto a força  $T'$  representa a força de atrito oposta a esse escorregamento. A razão  $T/N(t)$  representa o atrito requerido, enquanto  $T'/N'(t)$  representa o atrito utilizado. Seu valor é função do atrito requerido e do atrito existente ( $T_{max}/N'(t)$ ) que depende de condições tribológicas, como o estado da superfície. O atrito existente é o valor máximo possível que a razão  $T'/N'$  pode ter em determinado instante. Se o atrito requerido é maior que o atrito existente, o pé irá escorregar sobre a superfície. Dessa forma, para prevenir o escorregamento:

$$\mu_{\text{existente}} \geq \mu_{\text{requerido}} \quad (1)$$

onde  $\mu$  é o coeficiente de atrito.

O atrito  $T'/N'(t)$ , que é proporcional a força oposta (resistiva) ao movimento de escorregamento, é normalmente referido como a resistência ao escorregamento ou resistência à derrapagem. A resistência ao escorregamento oferecida por um sapato ou superfície revestida pode ser estimada,

direta ou indiretamente, por meio de um dispositivo mecânico com um critério que pode variar inversamente com o atrito (por exemplo, o deslocamento do pé ao escorregar).

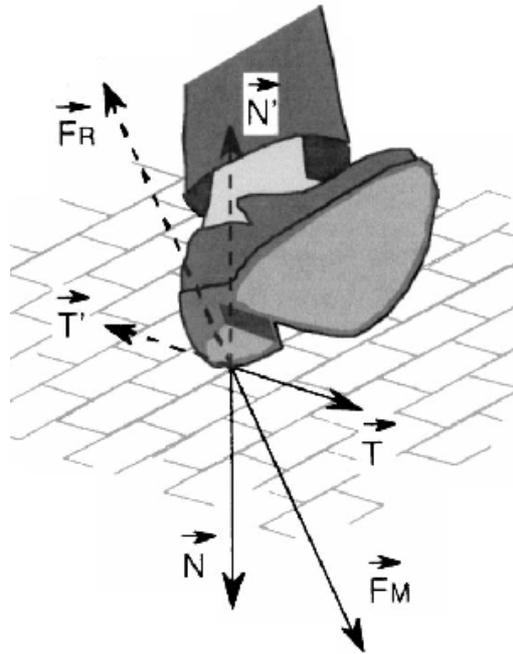


Figura 3. Representação das forças existentes na interface entre o pé e o solo no momento em que o calcanhar toca o solo (em um determinado tempo  $t$ ) (Leclercq, 1999).

O atrito necessário, freqüentemente chamado de atrito requerido, é função de uma específica atividade do modo de andar, ou seja, uma corrida de velocidade (100 metros rasos, por exemplo) requer mais atrito do que uma simples caminhada. O atrito requerido não é diretamente uma função dos materiais e condições da interface entre a planta do pé e o solo. O atrito requerido é determinado pela travessia de pedestres sobre uma placa de força instrumentada, que grava as forças e momentos envolvidos no contato entre o pé e o solo. O atrito observado entre a planta do pé e o solo, chamado de atrito existente, é medido por um WST (*Walkway-safety tribometer*).

## 6. INSTRUMENTOS PARA MEDIÇÃO DO ATRITO NO CONTATO ENTRE O PÉ E O SOLO - WSTs

WSTs são instrumentos que medem o atrito entre um pé de teste e uma superfície de caminhada. Diferentes WSTs oferecem diferentes resultados em uma dada situação porque eles medem o atrito de formas distintas. Isto cria uma certa confusão que tem levado a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) a procurar a implementação de equipamentos não proprietários, ou seja, a implementação de um equipamento “genérico” para testes padrões.

Muitos fatores contribuem para o escorregamento, como por exemplo a acuidade visual (luminosidade e presença de distrações), que afeta a percepção das pessoas. O maior fator de escorregamento é a “ausência” de atrito que ocorre na interface de caminhada. Os componentes desta interface são a sola dos sapatos (ou planta dos pés), a superfície de contato e qualquer contaminante residindo entre eles. Já que o objetivo é quantificar o atrito que é experimentado pelo pé, qualquer WST usado para quantificar o nível de atrito entre a planta do pé e a superfície de contato deve ter “biofidelidade”, ou seja, os parâmetros de interface do instrumento devem ser similares aos parâmetros relacionados ao caso real do pedestre.

O ideal seria que todos os WSTs de mesmo tipo fornecessem resultados idênticos, e aqueles de tipos diferentes fornecesse resultados substancialmente similares. Contudo isso não ocorre devido a fatores como: as imperfeições superficiais (as superfícies a serem medidas podem variar

substancialmente de ponto a ponto e com o tempo) e ao fato do atrito não ser somente uma propriedade do material e sim uma propriedade do sistema (nesse caso, uma propriedade do WST).

Quando a interface entre o pé e o solo está seca e não-contaminada, diferentes tipos de WSTs fornecem resultados aproximadamente similares. Por outro lado, quando a superfície está contaminada, por exemplo, por água, diferentes tipos de WSTs fornecem resultados muito distintos. Por exemplo, existem WSTs cujas medidas são baseadas nas forças de atrito e outros cujas medidas são baseadas nas forças hidrodinâmicas. Neste caso, os WSTs desta última classe conseguem mostrar corretamente que uma superfície molhada é mais escorregadia que uma seca, enquanto os da outra classe não o fazem.

## 7. HISTÓRIA DA TRIBOMETRIA NA LOCOMOÇÃO

O desenvolvimento de instrumentos para medir o atrito na interface entre o pé e o solo evoluiu muito no século passado e representa atualmente um assunto de certa importância. Alguns dos primeiros WSTs datam do ano de 1920. É interessante notar que alguns WSTs atuais foram desenvolvidos a partir de mecanismos utilizados em antigos modelos. Por exemplo, o Tribômetro de Hunter criado nos anos 20 foi base para o Tribômetro de James (Fig. (4)) construído nos anos 40, que evoluiu para a era dos tribômetros de Brungraber a partir de 1960.

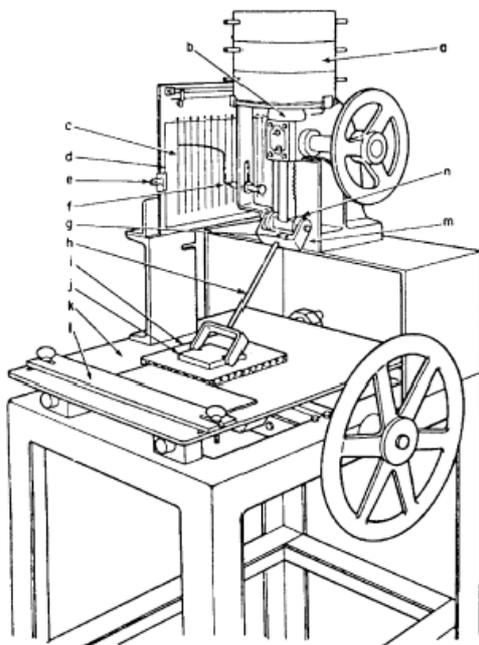


Figura 4. Tribômetro de James, criado por Syd James nos anos 40 (Marpet, 2001).

Inicialmente, Robert Brungraber desenvolveu um modelo portátil análogo ao Tribômetro de James conhecido como “Tribômetro Portátil de Suporte Articulado” (PAST). Depois foi criado o chamado “Tribômetro Portátil de Suporte Articulado Inclinável” (PIAST). O PIAST foi o primeiro WST a medir o que chamamos de atrito transicional, que é aquele que ocorre na fronteira entre o atrito estático e dinâmico. Mais recentemente, no princípio dos anos 90, William English desenvolveu o chamado “Tribômetro de Incidência Vertical” (VIT), que é bastante similar ao modelo PIAST de Brungraber, diferenciando-se apenas no tamanho do pé, que é menor, e no acionamento realizado por um cilindro pneumático.

## 8. ALGUNS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A maioria dos estudos relacionados ao escorregamento no contato do pé com o solo sugerem que o deslocamento do pé ao escorregar e a velocidade desse escorregamento são fatores determinantes tanto num escorregamento induzido que resultará numa queda como na estabilidade

dinâmica que pode ser restaurada. Baseado em trabalhos anteriores (em particular Brady *et al.*, 2000), observa-se que tem sido geralmente aceito que uma queda irá ocorrer como resultado de um escorregamento se, durante esse escorregamento, o deslocamento do pé que escorrega excede 10 cm e se a velocidade máxima de escorregamento excede 50 cm/s. Entretanto, observações qualitativas e a experiência sugerem que a recuperação da estabilidade dinâmica é possível mesmo que esses limites sejam excedidos. Testes mais recentes demonstram que a recuperação é possível para deslocamentos da ordem de 20 cm e com velocidades máximas de 100 cm/s. Estatisticamente falando, quanto maior o deslocamento causado por escorregamento menor será a probabilidade de recuperação da estabilidade do equilíbrio, como mostrado na Fig. (5).

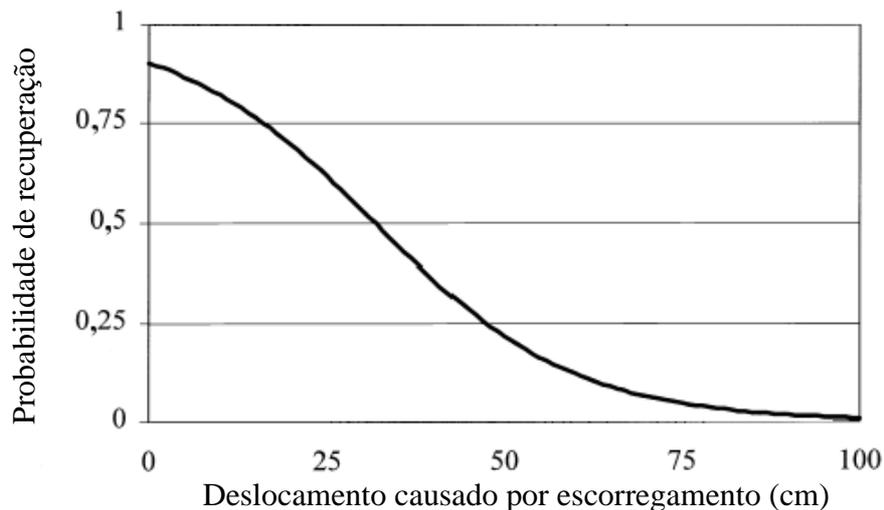


Figura 5. Probabilidade de recuperação da estabilidade em função do deslocamento causado por escorregamento (Brady *et al.*, 2000).

A diferença entre os resultados pode estar na metodologia aplicada. No primeiro caso foram usados poucos indivíduos que deveriam escorregar diversas vezes seguidas, enquanto no caso mais recente, com um maior número de indivíduos, cada um escorregou uma única vez. Esses resultados diferentes apontam para importância na melhora no estudo sistemático dos mecanismos de relação entre escorregamento e queda, para que os mesmos sejam melhor entendidos e que meios de redução na incidência de injúrias causadas por escorregamento possam ser projetados.

É interessante notar também que um pequeno ângulo formado quando o pé em balanço toca o solo, resultante de uma longa passada, oferece ao indivíduo uma predisposição a quedas após o escorregamento. As dimensões da superfície de escorregamento podem limitar o deslocamento e a velocidade de escorregamento, e a desaceleração do pé que escorrega, causada pelo aumento do atrito na superfície, pode ajudar na recuperação. Entretanto, os únicos mecanismos fisiológicos existentes são os processos reflexivos, automáticos e voluntários. A ativação reflexiva é efetiva na restauração do controle da postura após um escorregamento.

Outro tipo de experimento interessante é a avaliação do efeito do escorregamento no movimento do centro de massa corporal em relação à base de suporte. O deslocamento e a velocidade do centro de massa em relação à base de suporte são fatores biomecânicos indispensáveis para a pesquisa sobre o escorregamento durante a locomoção. Segundo You *et al.* (2001), a análise do deslocamento e velocidade do centro de massa pode ser usada para avaliar o equilíbrio do corpo e evitar o escorregamento.

## 9. MUDANÇAS NO PADRÃO DE LOCOMOÇÃO CAUSADAS POR UM TROPEÇÃO

Além do problema de escorregamento, um outro problema que pode causar quedas durante a locomoção é a presença de um obstáculo no caminho, o que pode resultar no chamado tropeção. O

estudo de tropeções e reações de recuperação fornece informação sobre parâmetros que influenciam na probabilidade de queda. Um aumento na velocidade de locomoção e no comprimento do passo aumenta a probabilidade de queda após um tropeção. Por outro lado, o comprimento do passo em baixas velocidades, a flexão do tronco e a fase do modo de andar na qual ocorre o tropeção não afetam a probabilidade de queda (Pijnappels *et al.*, 2001).

Durante a recuperação após um tropeção, a rotação do corpo para frente deve ser controlada. Os ângulos de flexão do tronco, quadril e joelhos tem um papel importante na recuperação de um tropeção. Uma perna perturbada ou é jogada para baixo na frente do obstáculo ou erguida sobre o obstáculo, possibilitando dessa forma a restauração do equilíbrio. Isto requer a coordenação das juntas dos membros inferiores e o controle do centro de massa. A mudança observada no comprimento do passo não tem efeito sobre a reação de recuperação. Somente um aumento da flexão na junta do tornozelo durante a fase de balanço da perna pode ser interessante durante as estratégias de recuperação. A Figura 6 apresenta um experimento utilizado para avaliação do comportamento do pedestre ao encontrar algum obstáculo durante a locomoção.

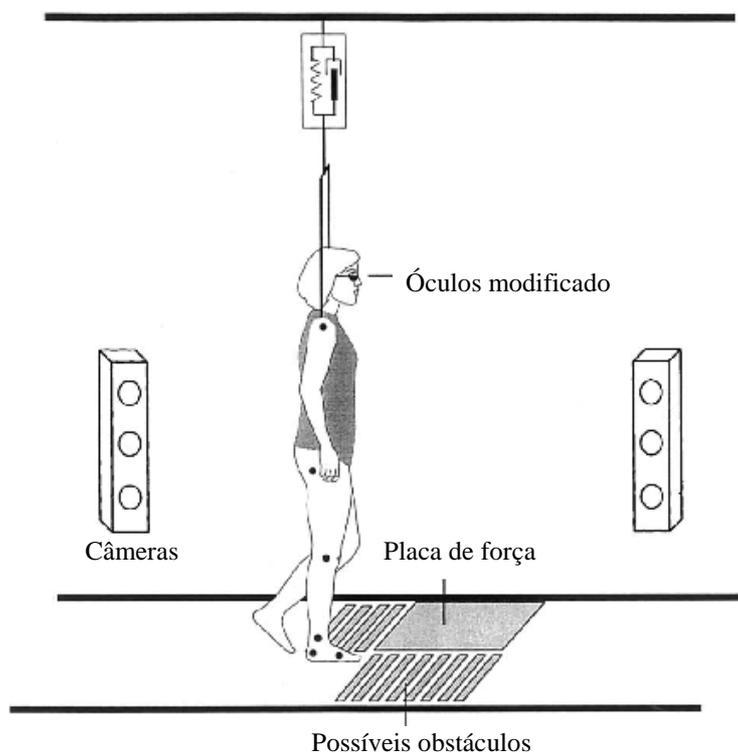


Figura 6. Experimento utilizado para avaliação do comportamento do pedestre ao encontrar algum obstáculo durante a locomoção (Pijnappels *et al.*, 2001).

## 10. ESTRATÉGIAS PARA REDUÇÃO DOS PROBLEMAS CAUSADOS POR QUEDAS

Escorregamentos durante vários tipos de movimentos freqüentemente levam a quedas potencialmente perigosas. Estratégias de movimentação poderiam ser utilizadas para recuperar a estabilidade no caso de escorregamento. Nos anos 90 uma série de estratégias de intervenção foi proposta para reduzir o grau de injúrias relacionadas a quedas, como por exemplo, a terapia medicinal para reduzir a fraqueza dos ossos devido a osteoporose e a aplicação de almofadas protetoras nos quadris para reduzir a severidade do impacto da queda. Outras estratégias foram idealizadas para ajudar a prevenir as quedas, como por exemplo, a modificação dos ambientes para reduzir a probabilidade de escorregões e tropeções.

De acordo com Pai & Iqbal (1999), uma estratégia que pode ter um grande potencial quando usada em conjunção com outras abordagens é invocar os mecanismos neuro-musculares protetores dos próprios pacientes para prevenir uma queda iminente, reduzindo assim a incidência de quedas. Com respeito a esse conceito, seria altamente desejável desenvolver estratégias de movimentos

protetores invocáveis que serviriam para resistir a perda de equilíbrio e permitir a execução de funções de movimentos regulares sob qualquer superfície.

## 11. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho aqui apresentado consiste de uma análise de vários artigos relacionados ao estudo da estabilidade e do atrito durante a locomoção. Após essa análise torna-se possível avaliar a importância de certos aspectos ligados a estabilidade e ao atrito. Dentre eles podemos destacar os seguintes:

- As quedas por escorregamento ou tropeção representam um dos principais problemas causadores de ferimentos acidentais e são a principal causa de morte em cidadãos idosos. Essa é a principal razão pela qual o estudo do assunto torna-se tão importante e existe um grande investimento em pesquisas.
- A restauração do equilíbrio após o escorregamento ou tropeção é usualmente alcançada por complexos mecanismos de controle neural e motor. Essa complexidade dificulta bastante o estudo de meios possíveis de evitar as quedas ou restaurar a estabilidade na locomoção.
- Durante a locomoção pelo menos uma das superfícies (a planta do pé) sofre deformação elástica. Isso complica a análise do atrito uma vez que não podemos assumir que o mesmo seja independente da velocidade, pressão, tempo, dentre outros fatores. Desta forma o atrito torna-se mais do que uma simples propriedade dos materiais.
- escorregamento pode ocorrer numa das duas transições entre as fases de suporte duplo e simples: ou quando o calcanhar da perna em balanço toca o solo ou no momento em que ocorre o impulso do pé para o balanço da perna. Esse conhecimento é muito importante, pois de certa forma mostra um dos pontos a serem considerados em qualquer análise com o objetivo de evitar ou pelo menos reduzir os problemas de quedas. Representa também um ponto de partida para elaboração de estratégias para reduzir o grau de injúrias relacionadas a quedas.
- Para um melhor desempenho dos instrumentos de medida do atrito durante a locomoção, e também confiança nos resultados obtidos, é preciso criar equipamentos não proprietários, ou seja, um equipamento “genérico” para testes padrões seguindo normas adotadas pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

## 12. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar sua gratidão ao CNPq, CAPES e FAPERJ pelo apoio financeiro fornecido durante o decorrer deste presente trabalho.

## 13. REFERÊNCIAS

- Beer, F. P., Johnston Jr., E. R., 1990, *Mecânica Vetorial para Engenheiros: Estática*. Tradução de Adolpho Hengeltraub, 3ª ed., São paulo, Makron, McGraw-Hill.
- Brady, R. A., Pavol, M. J., Owings, T. M., Grabiner, M. D., 2000, “Foot displacement but not velocity predicts the outcome of a slip induced in young subjects while walking”, *Journal of Biomechanics*, Vol. 33, pp. 803-808.
- Dutra, M. S., 1995, *Bewegungskoordination und Steuerung einer zweibeinigen Gehmaschine*. Aachen, Germany, Shaker Verlag.

- Leclercq, S., 1999, "The prevention of slipping accidents: a review and discussion of work related to the methodology of measuring slip resistance", *Safety Science*, Vol. 31, pp. 95-125.
- Marpet, M. I., 2001, "Problems and progress in the development of standards for quantifying friction at the walkway interface", *Tribology International*, Vol. 34, pp. 635-645.
- Pai, Yi-C., Iqbal, K., 1999, "Simulated movement termination for balance recovery: can movement strategies be sought to maintain stability in the presence of slipping or forced sliding?", *Journal of Biomechanics*, Vol. 32, pp. 779-786.
- Pijnapples, M., Bobbert, M. F., Van Dieën, J. H., 2001, "Changes in walking pattern caused by the possibility of a tripping reaction", *Gait and Posture*, Vol. 14, pp. 11-18.
- Rice, J. R., Lapusta, N., Ranjith, K., 2001, "Rate and state dependent friction and the stability of sliding between elastically deformable solids", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 49, pp. 1865-1898.
- You, Jia-Y., Chou, You-L., Lin, Chii-J., Su, Fong-C., 2001, "Effect of slip on movement of body center of mass relative to base of support", *Clinical Biomechanics*, Vol. 16, pp. 167-173.

## **STUDY OF STABILITY WHEN THE FOOT COMES INTO CONTACT WITH THE GROUND IN THE COURSE OF BIPEDAL LOCOMOTION**

### **Max Suell Dutra**

Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/PEM, Mechanical Engineering Department, C.P. 68503, CEP. 21945-970, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.  
E-mail: max@serv.com.ufrj.br

### **Armando Carlos de Pina Filho**

Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/PEM, Mechanical Engineering Department, C.P. 68503, CEP. 21945-970, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.  
E-mail: pina-filho@bol.com.br

**Abstract.** *To maintain the stability of the body during the performance of a step is one of the main problems related to the bipedal locomotion. One of the factors to be analyzed is the center of mass of the system. It is necessary a detailed analysis of the distribution of mass and of the "displacement" of the center of mass of the body. Another important point is the study of stability when the foot comes into contact with the ground. The locomotor must be able to perform the locomotion in many different surfaces, with distinct shapes or materials, maintaining the stability during the motion and also restoring that stability in case of a disturbance, for example, a tripping. This work has the purpose of evaluating the several factors related to the study of stability and friction, such as: the gaits and the reaction forces between the foot and the ground, the possible strategies to avoid sliding and make possible the performance of steps, the use of specific equipment to measure the friction when the foot comes into contact with the ground, etc. The results of this research may help to determine stable gaits, making possible the development of control mechanisms to bipedal locomotors.*

**Keywords:** *Friction, Stability, Locomotion, Tribometer.*