

Oscilando uma haste flexível para desafiar o equilíbrio postural

Luciano Fernandes Crozara
Faculdade de Educação Física e
Fisioterapia
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brazil
ORCID: 0000-0003-4957-303X

Eduardo Martins Brandão
Faculdade de Educação Física e
Fisioterapia
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brazil
ORCID: 0000-0003-0997-279X

Lázaro Luiz Duarte Neto
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brazil
ORCID: 0000-0003-2995-5137

Resumo—As hastes flexíveis têm sido utilizadas como dispositivos de treinamento físico/motor em diversos contextos reabilitativos e esportivos. Ao oscilar voluntariamente uma haste flexível o executante recebe de volta sobre seu corpo (ou parte dele) um estímulo mecânico cíclico com determinada frequência e amplitude (i.e. vibração). Este estímulo vibratório tem sido utilizado para evocar atividade reflexa e muscular, melhorando o controle e desempenho muscular. No entanto, pouco se sabe se a vibração promovida pela oscilação de uma haste flexível tem potencial para aprimorar o equilíbrio postural. Portanto, o objetivo deste estudo foi desenvolver um modelo teórico simplificado, biomecanicamente embasado, para demonstrar como a oscilação de uma haste flexível pode aumentar a demanda de equilíbrio do sistema de controle postural e, eventualmente, aprimorá-lo através de seu uso crônico.

Palavras-chave — controle postural, haste flexível, vibração

I. INTRODUÇÃO

O equilíbrio é uma habilidade motora essencial para o desempenho eficiente e seguro das tarefas da vida diária e pode ser definido, do ponto de vista biomecânico, como a habilidade do indivíduo em manter ou realocar seu centro de massa corporal total (CoM) dentro dos limites de estabilidade de sua base de suporte [1,2]. A capacidade de controle do CoM pode ser expressa pelo centro de pressão (CoP) [1]. O CoP se move em fase com o CoM para reduzir a oscilação corporal, por exemplo, nas direções anterior-posterior (a-p) e médio-lateral [1]. Esse controle é fornecido pelo sistema de controle postural, parte do controle motor envolvido na manutenção da postura ereta, um dos primeiros sistemas a reagir a uma dada perturbação externa e/ou interna para restaurar ou manter o equilíbrio [2,3].

Uma forma de aprimorar o equilíbrio é pelo refinamento dos ajustes compensatórios de controle postural em resposta à perturbação do equilíbrio. De fato, para que o sistema de controle postural se torne mais eficiente (i.e. resiliente) em manter o equilíbrio é necessário desestabilizá-lo continuamente para que ocorra uma nova necessidade de estabilização, mais complexa do que a anterior [4]. Nesse contexto, oscilar uma haste flexível parece ser uma estratégia eficiente, simples e de baixo custo para desafiar continuamente os músculos a manterem determinada postura. As hastes flexíveis foram projetadas para gerar estímulos vibratórios de

baixa frequência em várias posições, direções e orientações por meio da contração muscular voluntária dos membros superiores [5].

Por fim, a haste flexível pode ser utilizada de maneira análoga ao que é conhecido como treinamento de equilíbrio baseado em perturbação. Esse tipo de intervenção se baseia em princípios de aprendizagem motora, onde a exposição repetida a perturbações posturais resulta em respostas compensatórias de equilíbrio mais eficazes [4]. No entanto, ainda não está claro como a haste flexível poderia ser utilizada como uma ferramenta efetiva para o treinamento de equilíbrio. Portanto, nosso objetivo foi apresentar um modelo teórico simplificado, biomecanicamente embasado, para demonstrar como a oscilação de uma haste flexível pode aumentar a demanda de equilíbrio do sistema e, eventualmente, aprimorá-lo através de seu uso crônico.

II. MODELO TEÓRICO

A. Descrição do uso correto/desejado da haste flexível

As hastes flexíveis são osciladas por meio da contração muscular voluntária; os flexores e extensores do cotovelo, juntamente com os músculos estabilizadores do punho, ombro e tronco são os principais músculos envolvidos neste processo, independentemente da posição adotada [6]. Basicamente, quando o sujeito "sacode" a haste flexível na direção ântero-posterior, flexionando e estendendo o cotovelo com esforço mínimo, no plano sagital ou transversal de oscilação, por exemplo, ambas as extremidades da haste flexível irão balançar até atingir uma frequência de oscilação natural de ~5Hz.

Em uma descrição mais detalhada, considerando o uso correto da haste, no início do movimento oscilatório, a porção mediana da haste (empunhadura) é movimentada por meio de força externa (i.e. contração muscular), enquanto suas extremidades permanecem momentaneamente em sua posição de equilíbrio (em repouso, devido à inércia). Assim, a energia cinética do movimento inicial é transmitida à haste e armazenada como energia potencial elástica através da deformação do material da haste que, em seguida, é devolvida em energia cinética para acelerar suas extremidades na direção e sentido do movimento. Para continuar a oscilação da haste, a

força externa deve ser aplicada na mesma direção, e seu sentido alterado ciclicamente até que as extremidades da haste atinjam a frequência de ressonância de 5 Hz. Depois de atingir sua frequência de oscilação característica, praticamente nenhum movimento na empunhadura é observado, exceto pequenos impulsos que são necessários para manter sua frequência e amplitude de oscilação, uma vez que a energia do sistema é dissipada pela rigidez da haste [5] e, principalmente, pelo amortecimento promovido pelos músculos, tecidos e fluidos do corpo [7].

Mais especificamente, a vibração produzida pelo movimento oscilatório da haste flexível é transmitida para todo o corpo através das mãos ao longo dos braços e ombros, e para o restante do corpo, atuando sobre os músculos esqueléticos [7].

B. Mecânica oscilatória da haste flexível

Alguns tipos de haste flexível estão descritos na literatura científica [5,6]. Uma haste flexível foi modelada em um estudo anterior por uma abordagem de modelagem de parâmetros concentrados [5]. No entanto, no presente estudo um modelo mais simplista foi desenvolvido apenas para mostrar como a oscilação da haste flexível pode afetar a oscilação do corpo durante a postura ereta para desafiar o sistema de controle postural em manter o equilíbrio.

As características estruturais da haste flexível determinam sua mecânica oscilatória quando ela é manipulada (Figura 1A). Nesse sentido, o movimento da haste flexível é classificado como um movimento harmônico simples, ou seja, um mecanismo que realiza movimentos de "vaivém" em torno de uma posição de equilíbrio; esse movimento oscilatório é caracterizado por uma frequência e se apresenta de forma senoidal. Portanto, a oscilação mecânica da haste flexível pode ser entendida, de forma simplificada, por um sistema mola-massa (Figura 1B).

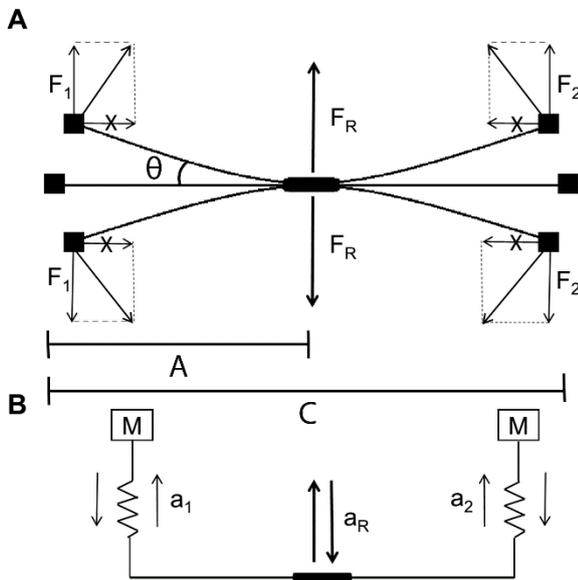


Fig. 1. Modelo da haste flexível.

O movimento desse sistema é regido pela Lei de Hooke, que relaciona a força restauradora com o deslocamento da massa e afirma que:

$$F = -kx \quad (1)$$

onde F é a força restauradora, k é a rigidez da haste e x é o deslocamento.

Dado que, pela 2ª Lei de Newton, a força é expressa por:

$$F = ma \quad (2)$$

onde m é a massa e a é a aceleração, a aceleração de cada extremidade da haste flexível é dada por:

$$ma = -kx \quad (3)$$

onde x é a deformação da mola e, no caso da haste, pode ser dividida no eixo x e y . Considerando que as forças no eixo x se anulam no centro, pode considerar que a aceleração será:

$$a = -\frac{kx}{m} \quad (4)$$

Como y é deslocamento no eixo y , pode ser expresso como $Asen(\theta)$, onde θ é o ângulo formado entre a base (quando a haste não sofre deformação) e o deslocamento y da haste e A é o segmento entre o centro e a ponta da haste, conforme a figura 1.

Considerando que a haste flexível possui dois sistemas massa-mola idênticos, fixados em um ponto comum (empunhadura), foi assumido que a aceleração resultante (a_R) da haste é dada por:

$$a_R = -\frac{2kAsen(\theta)}{m} \quad (5)$$

Como A é a distância do centro a ponta da haste, $2A$ será C , que representa o comprimento total da haste, e o ângulo varia conforme o movimento oscilatório da haste, ficando a aceleração:

$$a_R = -\frac{kCsen(\omega t)}{m} \quad (6)$$

C. Efeitos mecânicos da oscilação de uma haste flexível durante a postura ereta

A postura bípede ereta quieta do ser humano pode ser descrita, de forma simplificada, por meio de um modelo simples de pêndulo invertido [8] (Figura 2A). Este modelo de pêndulo invertido simples na direção a-p é dado por:

$$CoP_x - CoM_x = \frac{-I_{sa}}{Ph} Co'M_x \quad (7)$$

onde CoP_x é a posição do CoP em relação à articulação do tornozelo na direção a-p, CoM_x é a posição do CoM em relação

à articulação do tornozelo na direção a-p, $Co'M_x$ é a aceleração horizontal do CoM na direção a-p, I_{sa} é o momento de inércia do corpo (exceto o pé) ao redor do tornozelo no plano sagital, P é o peso corporal (exceto o peso do pé) e h é a altura do CoM acima a articulação do tornozelo (Figura 2A).

Considerando que a aceleração da haste flexível ocorre apenas na direção a-p (a_{Rx}) e é aplicada ao CoM do modelo de pêndulo invertido simples (Figura 2B), temos a equação que afirma que:

$$CoP_x - CoM_x = \frac{-I_{sa}}{Ph} (Co'M_x + a_{Rx}) \quad (8)$$

Sendo que a_{Rx} é a aceleração provocada no centro da haste (empunhadura), pode-se substituir pela equação 6, ficando como:

$$CoP_x - CoM_x = \frac{-I_{sa}}{Ph} (Co'M_x - \frac{kCsen(\omega t)}{m}) \quad (9)$$

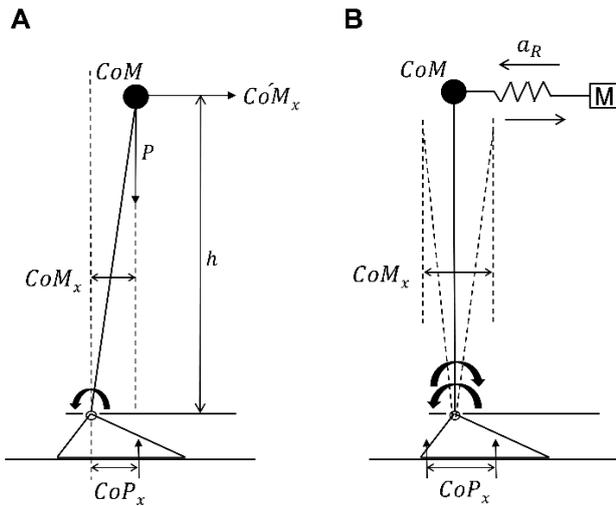


Fig. 2. Modelo do pêndulo invertido com a haste acoplada no eixo a-p

Portanto, a aplicação da oscilação da haste flexível no corpo durante a postura ereta pode aumentar a amplitude, aceleração e frequência de oscilação do CoM e a resposta do CoP, proporcionalmente às impostas pela haste flexível. Em outras palavras, o uso da haste flexível, nas condições citadas acima, promove um estímulo mecânico adicional sobre o corpo na direção a-p. Este estímulo pode levar a um aumento na exigência dos mecanismos de contração muscular para a manutenção da postura [2,3]. Além disso, quanto mais acima do CoM ocorrer a atuação de uma força horizontal em relação à articulação do tornozelo durante a postura ereta, maior será o momento angular gerado no sistema e, portanto, maior será o torque produzido nas articulações subjacentes para manter a postura ereta. Portanto, é razoável pensar que os estímulos de vibração mecânica, quando aplicados horizontalmente perto da extremidade superior do corpo (e.g. oscilação da haste flexível), durante a postura ereta, têm um maior efeito mecânico desestabilizador do equilíbrio do que quando aplicados em posições inferiores.

D. Efeitos neuromecânicos da oscilação de uma haste flexível durante a postura ereta

As atividades reflexas e musculares são algumas das respostas neuromecânicas mais eficazes para reduzir ou mitigar o efeito da perturbação/vibração no corpo, bem como para estabilizar os movimentos articulares, atuando como amortecedores de massa sintonizados [7]. Os mecanismos neurais potencialmente desencadeados em resposta à vibração produzida pela oscilação da haste flexível são: reflexo tônico de vibração (reflexos espinhais) e ajustes da atividade muscular, padrão de recrutamento e sincronização de unidades motoras, taxa de disparo e drive neural [7].

Com o estímulo de vibração promovido pela oscilação da haste flexível, presume-se que os músculos posturais estabilizadores são recrutados de forma mais eficaz em resposta à perturbação, contribuindo assim para um maior nível de co-contratação dos músculos agonistas e antagonistas para manter o tronco e as articulações estáveis, aumentando a rigidez do corpo e prevenindo ou controlando com mais precisão o curso do movimento corporal [7]. Portanto, é razoável pressupor que todos esses mecanismos, evocados pelo estímulo mecânico da oscilação de uma haste flexível, atuem em conjunto para manter a postura desejada e possam ser exercitados sistematicamente para melhorar o equilíbrio postural, principalmente em indivíduos com comprometimento do equilíbrio.

CONCLUSÃO

Concluimos que a haste flexível tem um potencial promissor para ser utilizada como um dispositivo de treinamento de equilíbrio, efetivo, seguro, de fácil implementação e de baixo custo. No entanto, deve-se levar em conta algumas limitações do modelo proposto, pois não foram considerados: 1) a capacidade dos músculos de amortecer o estímulo vibratório e sua transmissão ao longo do corpo todo, 2) os movimentos do corpo (CoM) no plano frontal e 3) a utilização da haste flexível orientada verticalmente. Nesse sentido, se torna necessário otimizar o modelo aqui proposto para ampliar o entendimento sobre os potenciais efeitos do uso da haste flexível como dispositivo de treinamento de equilíbrio postural. Além disso, recomenda-se a condução de estudos experimentais que visem desenvolver protocolos de treinamento com haste flexível e confirmem o real efeito de seu uso na reabilitação ou aprimoramento do sistema de controle postural em indivíduos com comprometimentos do equilíbrio.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Duarte and S. M. Freitas, "Revision of posturography based on force plate for balance evaluation," *Rev. Bras. Fisioter.*, vol. 14, pp. 183–192, May-Jun 2010.
- [2] F. B. Horak, "Postural orientation and equilibrium: what do we need to know about neural control of balance to prevent falls?," *Age Ageing*, vol. 35, Supplement 2:ii7–ii11, Sep 2006.
- [3] D. A. Winter, A. E. Patla, M. Ishac and W. H. Gage, "Motor mechanisms of balance during quiet standing," *J. Electromyogr. and Kinesiol.*, vol. 13, pp. 49–56, Feb 2003.

- [4] S. A. Harper, A. Z. Beethe, C. J. Dakin and D. A. E. Bolton, "Promoting generalized learning in balance recovery interventions," *Brain. Sci.*, vol. 22;11, pp. 402, Mar 2021.
- [5] M. Abdollahi, M. Nikkhoo, S. Ashouri, M. Asghari, M. Parnianpour and K. Khalaf, "A model for flexi-bar to evaluate intervertebral disc and muscle forces in exercises," *Med. Eng. Phys.*, vol. 38, pp. 1076–1082, Oct 2016.
- [6] K. N. Mileva, M. Kadr, N. Amin and J. L. Bowtell, "Acute effects of Flexi-bar vs. Sham-bar exercise on muscle electromyography activity and performance," *J. Strength Cond. Res.*, vol. 24, pp. 737–748, Mar 2010.
- [7] D. J. Cochrane, "The potential neural mechanisms of acute indirect vibration," *J. Sports Sci. Med.*, vol. 1;10, pp. 19–30, Mar 2011.
- [8] D. A. Winter, A. E. Patla, F. Prince, M. Ishac and K. Gielo-Perczak, "Stiffness control of balance in quiet standing," *J. Neurophysiol.*, vol. 80, pp. 1211–1221, Sep 1998.