

Artigo original

Ordem de recrutamento muscular em movimentos de reversão do braço em diferentes regiões espaciais

Gil Lúcio Almeida*, Nadia Fernanda Marconi*, Sandra MS Ferreira**

.....

**Laboratório de Pesquisas Clínicas em Fisioterapia, Universidade de Ribeirão Preto e Departamento de Fisiologia e Biofísica, Universidade Estadual de Campinas, **Instituto de Biociências do Campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista*

Resumo

Neste estudo testamos regras freqüentemente utilizadas para descrever a seqüência em que o Sistema Nervoso ativa a musculatura. Em particular, testamos a existência das seqüências proximal-distal e agonista-antagonista durante a execução de movimentos complexos. Para tanto, oito indivíduos realizaram movimentos planares de reversão em nove alvos colocados em três orientações espaciais diferentes. Para cada um destes movimentos, foram reconstruídos os deslocamentos angulares do ombro e do cotovelo e o deslocamento linear do dedo indicador. Simultaneamente foi registrada a atividade eletromiográfica dos músculos: bíceps braquial, tríceps cabeça lateral, deltóide anterior e deltóide posterior. Foi demonstrado que esses músculos não foram ativados em uma seqüência proximal-distal e que esta seqüência variou com a orientação espacial. Para uma das orientações espaciais, houve também uma reversão na seqüência agonista-antagonista na qual os músculos do cotovelo foram ativados. Os resultados são discutidos em termos da demanda mecânica das tarefas.

Abstract

In this study we tested the rules usually used to describe the sequence in which the Nervous System activated the muscles. In special, we tested if there are the proximal-distal and the agonist-antagonist sequences during the execution of complex movements. Eight individuals performed planar reversal movements towards nine targets placed in three special orientations. The angular displacement of the shoulder and elbow joints, and the linear displacement of fingertip was reconstructed, using one 3D motion analysis system. We also recorded the muscle activities of biceps, triceps, posterior and anterior deltoid during each movement. It was showed that these muscles were not activated in a proximal-distal sequence, and that this sequence changed with the spatial orientation. For one spatial orientation, there was a reversion in the agonist-antagonist sequence in which the elbow muscles were activated. The results are discussed in terms of the mechanic demand of the tasks.

.....

Endereço para correspondência: *Prof. Dr. Gil Lúcio Almeida, Curso de Fisioterapia da UNAERP, Av. Constâbile Romano, 2201, 14096-380 Ribeirão Preto - SP, Tel: (16) 603-6774, Fax: (16) 603-7025 (geral), E-mail: gla@odin.unaerp.br*

Introdução

Para realizar movimento voluntário é necessário que o Sistema Nervoso (SN) envie comandos para os neurônios motores alfa, para ativar a maquinaria contrátil e assim gerar as forças musculares necessárias à execução do movimento. As estratégias utilizadas pelo SN para modular e controlar estes comandos, enviados na forma de potenciais de ação, são objetos de inúmeros debates e estudos [1, 2, 3, 4]. Estas estratégias têm sido baseadas em estudos biomecânicos e de controle motor altamente sofisticados e são utilizadas no entendimento de disfunções e adaptações que acometem o sistema de controle motor [5, 6].

Por outro lado, existem muitas simplificações na descrição e caracterização dos mecanismos de controle motor dos movimentos humanos. Um exemplo, desta simplificação é a idéia, muito difundida, de que o SN primeiro

ativa a musculatura proximal e depois a distal. Outra simplificação é o uso da terminologia agonista e antagonista para descrever a ação da musculatura. O uso da terminologia agonista-antagonista, por sua vez, tem mais suporte empírico e científico do que a idéia da ativação preferencial da musculatura proximal. Por exemplo, a execução de movimentos uniarticulares simples, como a flexão do cotovelo, tem sido atribuída à geração de um padrão eletromiográfico (EMG) trifásico característico [7, 8]. Um primeiro envelope de atividade EMG agonista gera uma força muscular lançando o membro em direção ao alvo. Algumas dezenas de milissegundos após o início deste envelope agonista, um segundo envelope EMG antagonista inicia a aplicação do freio no movimento. Este envelope antagonista desacelera o membro em direção ao alvo. Finalmente um segundo envelope de atividade EMG agonista irá "travar" o membro ao alvo.

Para movimentos complexos, como o de reversão, envolvendo uma [9, 10, 11] ou mais articulações [12, 13] o padrão EMG é geralmente mais complexo do que o padrão trifásico descrito para os movimentos uniarticulares.

Outros estudos têm também demonstrado, que a seqüência em que os músculos são ativados varia com a orientação espacial na qual os movimentos são executados [14].

Aqui primeiramente demonstramos que a ativação da musculatura não segue necessariamente, um padrão proximal-distal. Segundo, a ordem de recrutamento dos músculos está associada com a demanda mecânica da tarefa e não necessariamente com uma ação agonista ou antagonista do músculo. Terceiro, discutimos as implicações clínicas da simplificação do conhecimento dos mecanismos de controle motor dos movimentos.

Métodos

Sujeitos

Oito indivíduos neurologicamente normais, quatro do sexo masculino e quatro do sexo feminino participaram deste estudo, após terem assinado um Termo de consentimento aprovado pelo Comitê de Ética da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Todos os voluntários eram destros e com idade entre 15 e 30 anos.

Tarefa

Cada voluntário realizou movimentos de reversão do braço, com envolvimento das articulações do ombro e cotovelo. As articulações do punho e da mão foram imobilizadas por um bracelete. Os movimentos foram divididos em três tarefas que variaram de acordo com a orientação espacial (180° , 90° e 0°). A linha no plano sagital, cruzando a linha média do corpo na direção ântero-posterior, definiu a orientação espacial de 90° . As linhas definindo a orientação espacial de 0° (direita) e 180° (esquerda) eram ortogonais à linha da orientação espacial de 90° (figura 1).

Para a realização da tarefa, os voluntários permaneceram sentados em uma cadeira de altura ajustável junto a uma mesa. Nesta mesa, foram demarcadas as três orientações espaciais mencionadas acima. Um cabo preso ao teto da sala de experimento dava suporte a

Fig. 1

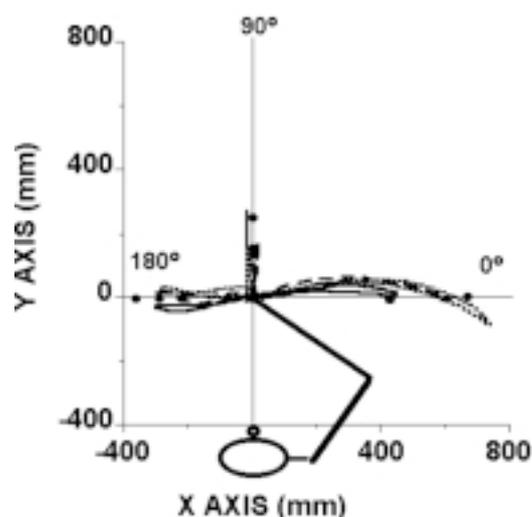


Figura 1: Ilustração da tarefa. Os movimentos planares de reversão do braço foram realizados em três orientações espaciais diferentes (180° , 90° e 0°). Para cada uma destas orientações, foram colocados, três alvos de forma a induzir uma amplitude angular específica (18° - linha cheia, 36° -linha tracejada ou 54° - linha pontilhada) na articulação do cotovelo, quando o dedo indicador atingisse o alvo. Na posição inicial a articulação do cotovelo permanecia à 90° de flexão. A escala dos eixos x e y estão em milímetros.

parte proximal do antebraço, permitindo que o braço movesse livremente dez centímetros acima do topo da mesa.

A posição inicial foi definida como a intersecção entre as linhas da orientação espacial de 90° e 0° . A ponta do dedo indicador foi mantida sobre a posição inicial, com a articulação do cotovelo à 90° de flexão (figura 1). Para cada orientação espacial, os voluntários realizaram movimentos em três alvos diferentes. Os alvos foram definidos de forma a induzir uma amplitude angular específica (18° , 36° ou 54°) na articulação do cotovelo quando o dedo indicador atingia o alvo.

Após ouvir um comando verbal, cada voluntário realizava movimentos planares, partindo da posição inicial, atingindo o alvo e retornando imediatamente à posição inicial. Foi solicitado aos voluntários que realizassem os movimentos "o mais rápido possível" sem enfatizar o tempo de reação. Todas as tarefas envolveram abdução (orientação espacial de 0°) ou adução (orientações espaciais de 90° e 180°) horizontal do ombro e o cotovelo sempre moveu em extensão.

Registro e processamento dos dados EMGs

Registramos a atividade EMG dos seguintes músculos: bíceps cabeça longa, tríceps cabeça lateral, deltóide anterior e deltóide posterior. Para este registro foram utilizados amplificadores DELSYS (modelo DE2.2L) de sinais EMGs com eletrodos de superfície, com um ganho total de 2000 e um filtro de 20-450Hz. Todos os dados EMGs foram digitalizados a uma frequência de 1000 quadros/segundo usando software Optotrak e unidade de sincronização.

Registro e processamento dos dados cinemáticos

Foram fixadas LEDs (luzes com emissão de diodo) no centro articular do ombro, cotovelo, punho e na ponta do dedo indicador. As coordenadas X e Y destas LEDs foram registradas utilizando um sistema óptico de análise de movimento (Optotrak 3020) a uma frequência de 100 quadros/segundo. Essas coordenadas foram utilizadas para reconstruir o deslocamento e a velocidade angular dos movimentos do ombro e cotovelo. A velocidade e o deslocamento linear do dedo indicador foram obtidos das coordenadas X e Y da marca do dedo indicador.

Cálculo da ordem de recrutamento muscular

O início da atividade EMG de cada músculo foi identificada visualmente. Para esta identificação foi plotado num monitor de computador a atividade EMG de cada músculo juntamente com a velocidade linear do dedo indicador. O início da atividade EMG foi identificado como uma mudança abrupta e sustentada no envelope desta atividade. A velocidade do dedo indicador foi utilizada para guiar a ocorrência da mudança abrupta na atividade EMG. Esta mudança deveria ocorrer entre 100 milissegundos, antes do início do movimento do dedo indicador, até o tempo em que o dedo indicador atingisse o alvo.

A identificação do início das atividades EMGs foram utilizadas para calcular as diferenças entre o início da atividade EMG dos músculos deltóide anterior, deltóide posterior e bíceps em relação ao início da atividade do tríceps. Esta diferença definiu a ordem de recrutamento dos músculos.

Resultados

Todos os sujeitos foram capazes de realizar as tarefas nas três orientações espaciais e nas três distâncias angulares conforme a instrução da tarefa. Note na Figura 2 que o deslocamento linear do dedo indicador ocorreu, conforme esperado, na direção espacial da tarefa (180° , 90° e 0°).

A velocidade linear do dedo indicador apresentou um formato de sino duplo, nas três orientações espaciais e nos três alvos (Figura 2).

Fig. 2

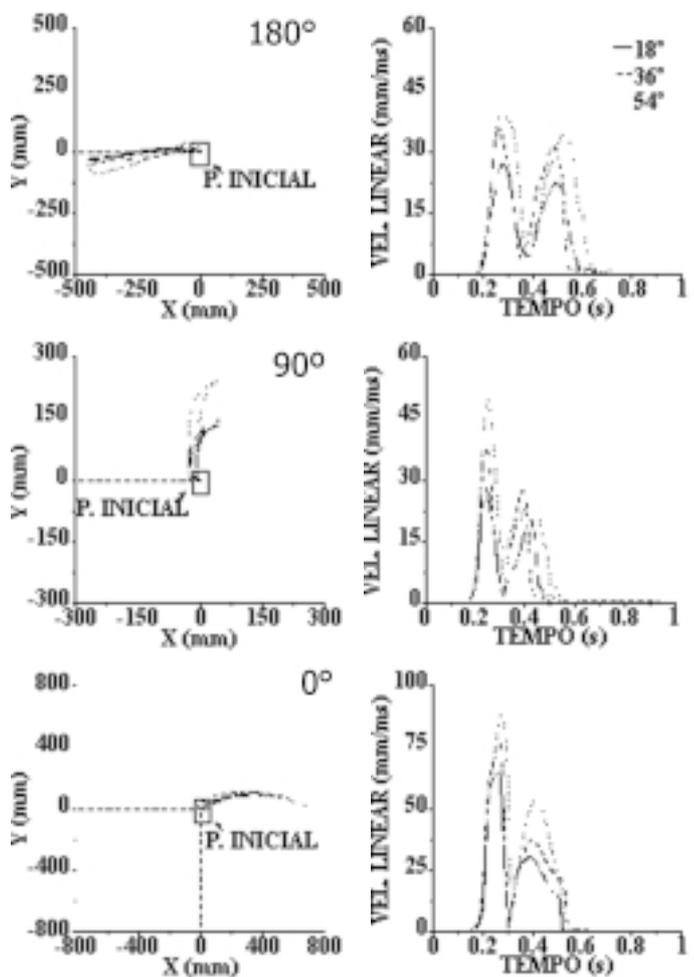


Figura 2: Trajetória linear do dedo indicador nos planos X e Y e velocidade linear do dedo indicador. Os movimentos são de um indivíduo realizando a tarefa nas três distâncias angulares (18° - linha cheia, 36° - linha tracejada ou 54° - linha pontilhada) e nas três orientações espaciais (180° - dois painéis da esquerda, 90° - dois painéis do centro e 0° - dois painéis da direita). A trajetória linear é dada em milímetros (mm) e velocidade linear em milímetros por milissegundos (mm/ms). O tempo é mostrado em segundos no eixo X.

O primeiro “sino” representa o movimento de ida em direção ao alvo. Ao passo que o segundo sino representa o movimento de volta em direção à posição inicial. O pico do primeiro “sino” ocorreu aproximadamente no meio do movimento de ida, quando o sujeito acelerou o membro em direção ao alvo. O pico do segundo “sino” ocorreu aproximadamente no meio do movimento de volta, quando o sujeito ainda estava acelerando o membro em direção à posição inicial. O menor valor da velocidade linear, durante o intervalo entre os dois picos, representa o instante que ocorreu a reversão do dedo indicador no alvo. Note na Fi-

gura 2 que a velocidade linear do dedo indicador aumentou para as distâncias maiores, nas três orientações espaciais.

Para todas as orientações espaciais, o cotovelo sempre moveu inicialmente em extensão (Figura 3a). No entanto, na orientação espacial de 180° e 90°, o ombro moveu inicialmente em adução horizontal e na orientação espacial de 0° em abdução horizontal (Figura 3b). A amplitude angular do ombro e do cotovelo variou com a orientação espacial e com a distância do alvo. O aumento da distância do alvo resultou no aumento do deslocamento e da velocidade angular dos movimentos das duas articulações.

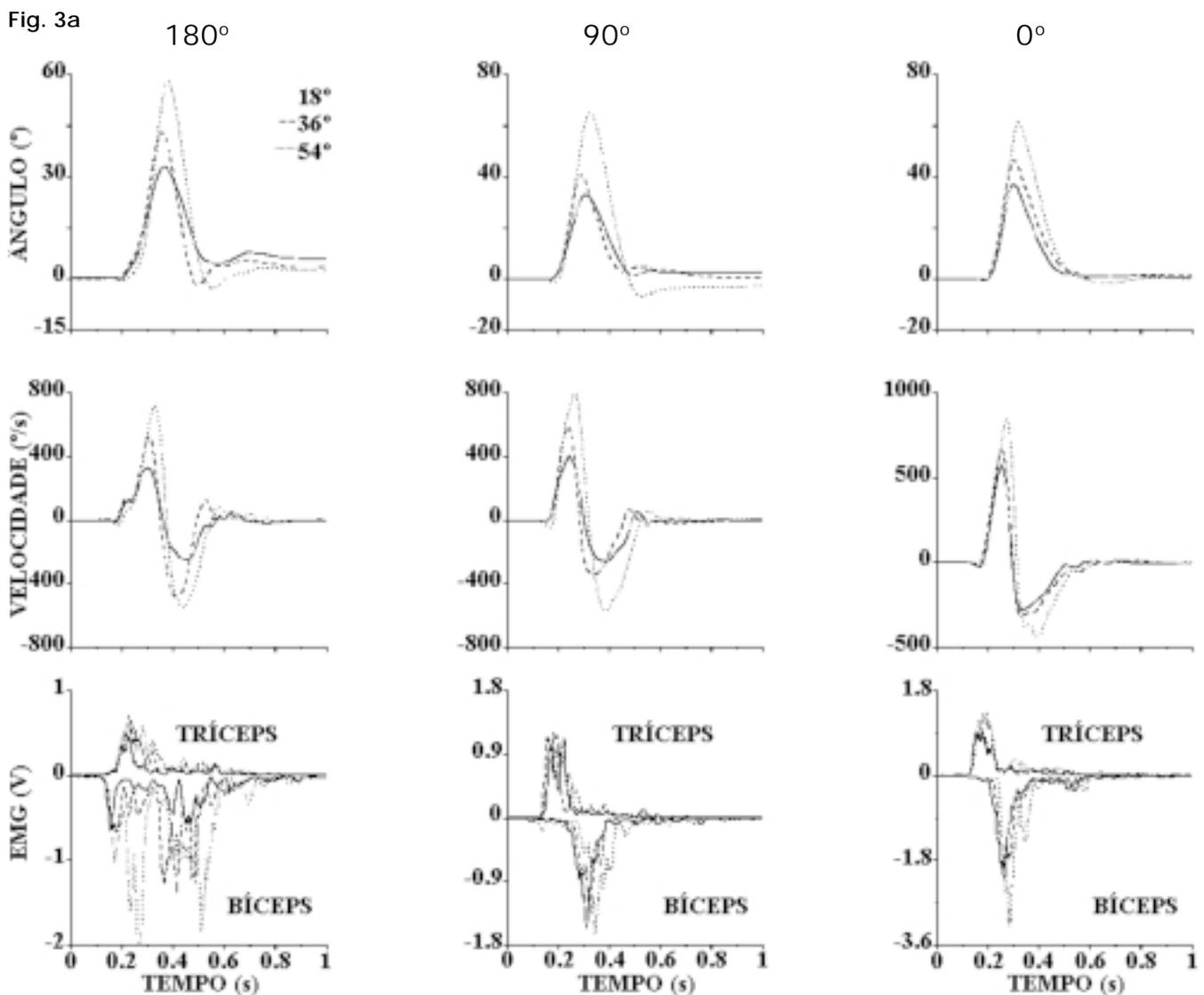
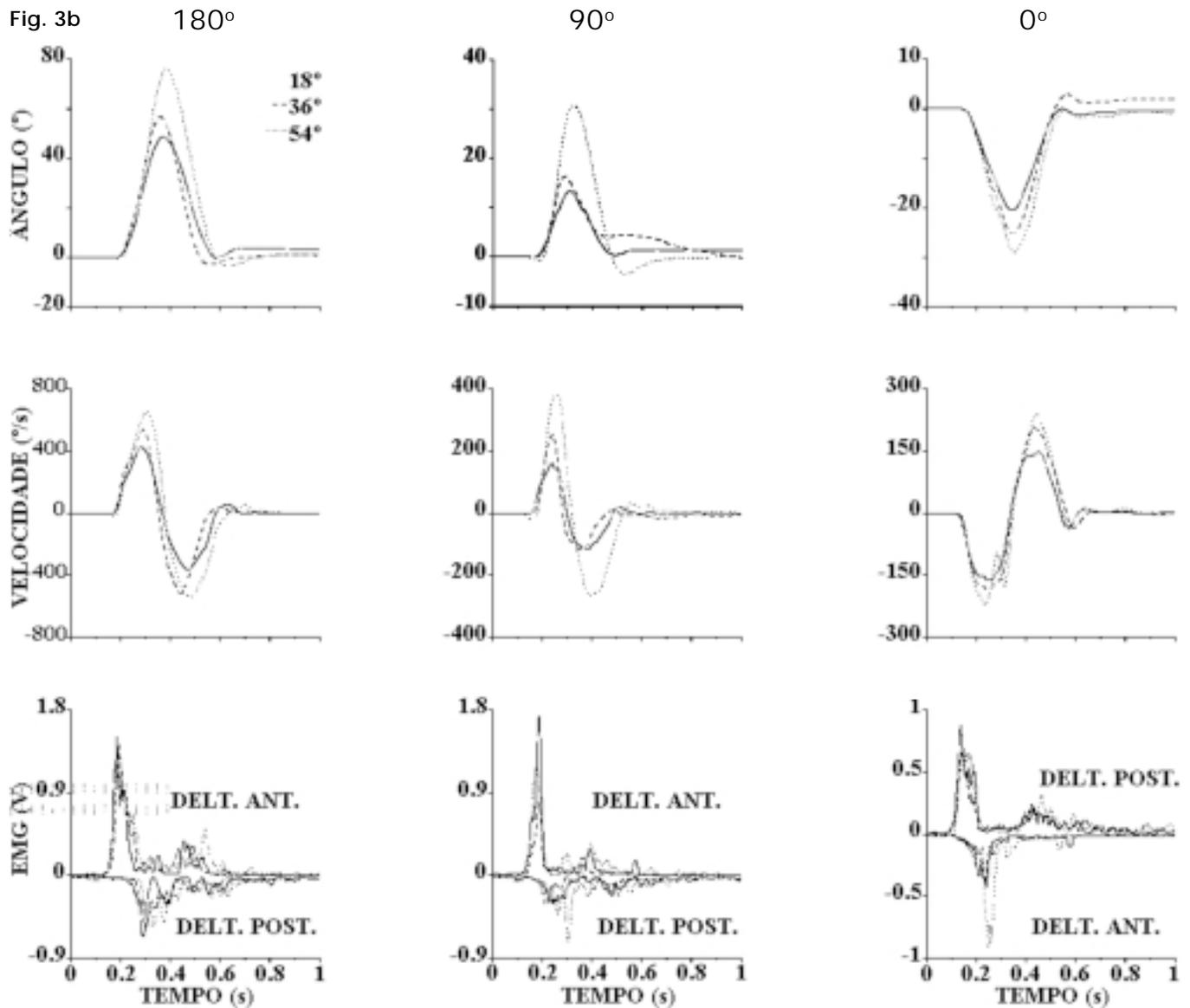


Figura 3: Deslocamento angular, velocidade angular e registros EMGs dos músculos tríceps e bíceps para o movimento do cotovelo (a) e deltóide anterior e deltóide posterior para o movimento do ombro (b). Os movimentos são de um indivíduo realizando a tarefa nas três distâncias angulares (18°- linha cheia, 36°- linha tracejada ou 54°- linha pontilhada) e nas três orientações espaciais (180°, 90° e 0°). Deslocamento angular dada em graus (°), velocidade angular em graus por segundo (°/s), registros EMGs em Volts (V) e tempo em segundos (s).



O registro EMG mostra um padrão recíproco de ativação da musculatura anterior e posterior do membro superior. De um modo geral, o padrão recíproco foi caracterizado por três envelopes de atividade EMG para a musculatura do ombro e do cotovelo. O primeiro envelope gerou uma força muscular que acelerou o membro em direção ao alvo. Esse envelope foi produzido pela atividade do músculo agonista. Após o início deste envelope agonista, a musculatura dita antagonista foi ativada, gerando um envelope antagonista. Esse envelope antagonista gerou uma força muscular que foi responsável em frear o membro no alvo, revertendo a sua direção e o lançando de volta à posição inicial. Um segundo

envelope de atividade EMG agonista gerou uma força muscular que desacelerou o membro em direção à posição inicial.

Este padrão recíproco, agonista-antagonista-agonista, pode ser utilizado para explicar a atividade EMG observada para a musculatura do ombro nas três orientações espaciais, mas não para a do cotovelo. Note que na orientação espacial de 180°, o cotovelo moveu inicialmente em extensão (figura 3a). No entanto, o bíceps, que seria o músculo antagonista, foi ativado antes do tríceps, o agonista deste movimento. Por outro lado, nas orientações espaciais de 90° e 0°, o cotovelo também moveu inicialmente em extensão, no entanto, o bíceps foi ativado depois do tríceps.

A ordem de recrutamento da musculatura do membro superior

A ordem de ativação destes músculos variou com a orientação espacial. Na orientação espacial de 180° e 90°, o movimento do ombro foi inicialmente em adução horizontal. Nestas duas orientações espaciais o deltóide anterior foi o músculo agonista e o deltóide posterior o antagonista. Já na orientação espacial de 0°, o movimento da articulação do ombro foi inicialmente em abdução horizontal. Nesta orientação, o deltóide posterior foi o músculo agonista e o deltóide anterior o músculo antagonista. Note na Figura 4 que o deltóide anterior foi ativado antes do tríceps e do deltóide posterior para as orientações de 180° e 90°. No entanto, este músculo foi ativado depois do tríceps e do deltóide posterior na orientação espacial de 0°.

Fig. 4

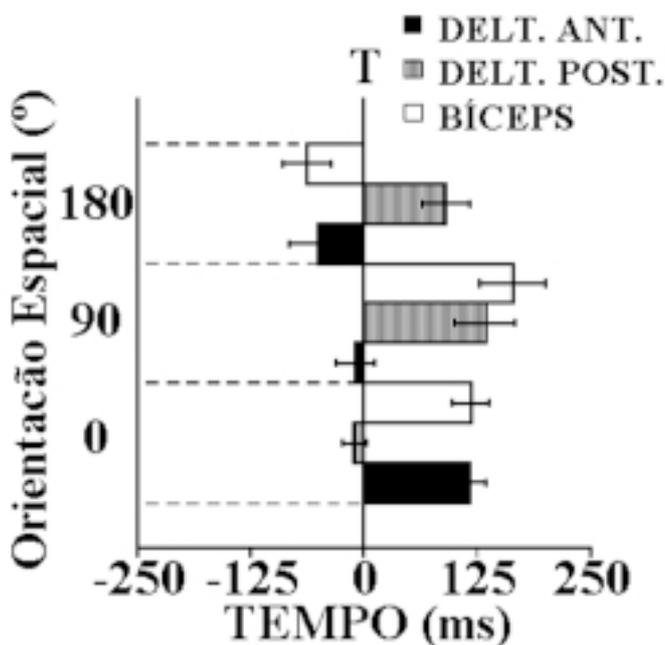


Figura 4: Ordem de recrutamento dos músculos deltóide posterior (barra hachurada), deltóide anterior (barra preta) e bíceps (barra branca) alinhados em relação ao início da atividade EMG do tríceps - "T". O início da atividade do tríceps - "T" é considerado aqui como tempo zero. Os dados são as médias de oito indivíduos para as três orientações espaciais (180°, 90° e 0°). O tempo é dado em milissegundos (ms).

Em todas as tarefas, o movimento da articulação do cotovelo foi sempre em extensão e teoricamente o agonista seria o tríceps e o antagonista o bíceps. Esta afirmativa é verdadeira para as orientações espaciais de 90° e 0°, mas não para a de 180°. Note na Figura 4 que o bíceps é ativado depois do tríceps para as orientações de 90° e 0°, mas é ativado por volta de 60 milissegundos antes do tríceps na orientação espacial de 180°. O resultado da ANOVA mostra o efeito da ordem de recrutamento dos músculos (bíceps, tríceps, deltóide anterior e posterior) para cada uma das três orientações espaciais (180°, 90° e 0°) estudadas. Este resultado comprova as observações citadas acima. Não foi testado o efeito da orientação espacial porque a ordem de recrutamento foi quantitativamente diferente (ver Figura 4).

Tabela I: Resultado da ANOVA para o efeito da ordem de recrutamento dos músculos.

Orientação espacial	F (3,23)	p
180°	13.31	0.0001
90°	4.93	0.0037
0°	31.98	0.0001

Discussão

A ativação dos músculos não segue necessariamente a seqüência proximal-distal

Os dados apresentados aqui não dão suporte a idéia de que a ordem de recrutamento da musculatura nos indivíduos normais segue um padrão proximal-distal [15, 16, 17, 18]. Se o Sistema Nervoso ficasse limitado à esta estratégia (proximal-distal) para recrutar a musculatura deveríamos observar uma antecipação da ativação da musculatura do ombro (deltóide anterior e posterior) em relação à musculatura do cotovelo. No entanto, em vários movimentos estudados a musculatura do ombro foi ativada depois do tríceps (Figura 3 e 4). Logo podemos concluir que o Sistema Nervoso não limita a sua estratégia de ativação da musculatura a uma seqüência proximal-distal. Esta flexibilidade na seqüência de ativação da musculatura possibilita ao SN inúmeras formas de modular a geração das forças musculares.

A terminologia agonista-antagonista não é apropriada para descrever alguns padrões de atividade EMG.

Clinicamente identificamos a direção do movimento e o mensuramos com um goniômetro manual. Da direção do movimento, deduzimos então, a ação do músculo, se agonista ou antagonista. Por exemplo, um movimento de extensão do cotovelo seria sempre iniciado pelo tríceps (agonista neste caso) e freado pelo bíceps (antagonista neste caso). Neste estudo também aprendemos que devemos ser cautelosos ao usar a terminologia agonista e antagonista para caracterizar a ação de um músculo. Por exemplo, na orientação espacial de 180° existe uma atividade inicial no bíceps que antecede a ativação do tríceps e mesmo da musculatura do ombro (Figura 4). Esta antecipação da ativação do bíceps, mesmo com o cotovelo movendo em extensão, auxilia a atividade do deltóide anterior na geração de uma força muscular em adução horizontal na articulação do ombro. Isto ocorre porque o bíceps cabeça longa é um músculo bi-articular e cruza as articulações do ombro e do cotovelo. Logo, a mudança na ordem de recrutamento observada na orientação espacial de 180° está relacionada à demanda mecânica da tarefa.

O achado de que a ordem de recrutamento da musculatura é afetada pela orientação espacial em que o movimento é executado (Figura 4) confirma resultados de outros estudos [14, 19, 20]. No entanto, de acordo com Hasan & Karst [14], esta mudança na ordem de recrutamento estaria relacionado à orientação espacial do antebraço no espaço. Como mencionado anteriormente, acreditamos que o SN faz esta inversão quando é necessário atender a demanda mecânica da tarefa.

A atividade EMG antecede o início do movimento [21]. Note na Figura 3a que o início da atividade EMG do tríceps cabeça lateral é antecipado em relação ao início do movimento de extensão do cotovelo nas orientações espaciais de 0° e 90°. O tempo desta antecipação é necessário para que o músculo coloque a sua maquinaria contrátil para funcionar, gerando uma força muscular que resista a inércia do membro. No entanto, na orientação de 180° a atividade do tríceps coincide com o início do movimento de extensão do cotovelo.

Logo, não houve tempo hábil para que o tríceps cabeça lateral gerasse uma força muscular que pudesse iniciar o movimento de extensão do cotovelo. Neste caso, não se pode descartar a possibilidade de que outros músculos não registrados (ancôneo e as cabeças longa e medial do tríceps) tenham sido ativados concomitantemente ou mesmo antes que o bíceps na orientação espacial de 180°.

A terminologia do padrão trifásico pode encobrir a complexidade do controle da atividade EMG

As atividades EMGs dos movimentos uniarticulares [7, 8, 9] e de reversão apresentados aqui e em outros estudos [10, 11, 12, 13], podem ser descritas por um padrão trifásico. Porém, existem similaridades e diferenças nas funções dos envelopes agonista-antagonista-agonista entre estes movimentos. O primeiro envelope agonista, de ambos os movimentos (uniarticulares e de reversão) tem a função de gerar uma força muscular que acelera o membro em direção ao alvo. No entanto, o primeiro envelope antagonista nos movimentos de reversão tem três funções distintas. Primeiro, este envelope desacelera o membro em direção ao alvo. Segundo, ele reverte a direção do movimento. Terceiro, ele acelera o membro em direção à posição inicial. Em movimentos uniarticulares, a função deste envelope é de apenas desacelerar o movimento no alvo. O segundo envelope agonista, também difere entre os dois tipos de movimentos. Nos movimentos uniarticulares o segundo envelope agonista tem a função de “travar” o membro na posição inicial. Já nos movimentos de reversão, o segundo envelope agonista tem a função de desacelerar o membro na posição inicial [7, 8]. Dessa forma, podemos concluir que para movimentos de reversão, as funções dos envelopes de atividade EMG são mais complexas do que para movimentos simples de apontar.

Implicações práticas

Como explicar a diferença de resultados que obtivemos, com os dados na literatura e nos inúmeros textos de Cinesiologia? Boa parte do que é ensinado nas disciplinas de Cinesiologia é baseado em estudos envolvendo o registro EMG,

sem uma reprodução concomitante da cinemática (ângulo, velocidade e aceleração) e/ou da cinética (torques musculares e de interação) dos movimentos. Existe uma relação causal fisiológica entre a geração da força muscular (formação das pontes de actina-miosina) e o sinal EMG [22]. Desta forma, acreditamos que para o entendimento dos mecanismos de controle motor dos movimentos é necessário o registro da atividade EMG dos músculos, porém, é imperioso também a reconstrução cinemática e cinética do movimento gerado por estas atividades. Os dados apresentados aqui demonstram claramente que teremos que estudar de forma bastante criteriosa os mecanismos de geração dos movimentos, se quisermos construir uma Cinesiologia mais sólida.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo -FAPESP (processos 95/9608-1; 97/02769-5 e 97/02771-0).

Referências

1. Asatryan DG, Feldman AG. Functional tuning of the nervous system with control of movement or maintenance of a steady posture - I. Mechanographic analysis of the work of the joint or execution of a postural task. *Biofizika*. 1965;10:837-846 [English translation 925-935].
2. Gottlieb GL, Corcos DM, Agarwal GC. Strategies for the control of single mechanical degree of freedom voluntary movements. *Behavioral and Brain Sciences* 1989;12(2):189-210.
3. Almeida GL, Hong D, Corcos DM, et al. Organizing principles for voluntary movement: Extending single-joint rules. *Journal of Neurophysiology* 1995;74(4):1374-81.
4. Gottlieb GL, Song Q, Almeida GL, et al. Directional control of planar human arm movement. *Journal of Neurophysiology*. 1997;78:2985-2998.
5. Almeida GL, Corcos DM, Latash ML. Practice and transfer effects during fast single-joint elbow movements in individuals with Down syndrome. *Physical Therapy* 1994;74(11):1000-1016.
6. Almeida GL, Campbell SK, Girolami GL, et al. The effect of intrathecal baclofen on function in patient with cerebral palsy: A case report. *Physical Therapy* 1997.
7. Hallett M, Shahani BT, Young RR. EMG analysis of stereotyped voluntary movements in man. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry* 1975;38:1154-1162.
8. Hannaford B, Stark L. Roles of the elements of the triphasic control signal. *Experimental Neurology*. 1985;90:619-634.
9. Schmidt RA, Sherwood DE, Walter CB. Rapid movements with reversals in direction. I. The control of movement time. *Experimental Brain Research* 1988;69:344-354.
10. Sherwood DE, Schmidt RA, Walter CB. Rapid movements with reversals in direction II. Control of movement amplitude and inertial load. *Experimental Brain Research* 1988;69:355-367.
11. Gottlieb GL. Muscle Activation Patterns During Two Types of Voluntary Single-Joint Movement. *Journal of Neurophysiology* 1998;(4):1860-1867.
12. Marconi NF, Controle motor em indivíduos neurologicamente normais e portadores da Síndrome de Down: O efeito do feedback intrínseco. 2000, Universidade Estadual de Campinas.
13. Ferreira SMS, Modulação da latência da musculatura antagonista em indivíduos neurologicamente normais e portadores da Síndrome de Down. 2000, Universidade Estadual Paulista.
14. Hasan Z, Karst GM. Muscle activity for initiation of planar, two-joint arm movements in different directions. *Experimental Brain Research* 1989;76:651-655.
15. Jöris HJJ, Edwards van Muyen AJ, van Ingen Schenau GJ, et al. Force, velocity and energy flow during the overarm throw in female hand-ball players. *Journal of Biomechanics*. 1985;18:409-414.
16. Herring RM, Chapman AE. Effects of changes in segmental values and timing of both torque and torque reversal in simulated throws. *Journal of*

- Biomechanics 1992;25:1173-1184.
17. Putnam CA. Sequential motions of body segments in striking and throwing skills. Descriptions and explanations. *Journal of Biomechanics* 1993;26 (suppl. 1):125-135.
 18. Sørensen H, Zacho M, Simonsen EB, et al. Dynamics of the martial arts high front kick. *Journal of Sports Sciences* 1996;14:483-495.
 19. Aoki F. Activity patterns of upper arm muscles in relation to direction of rapid wrist movement in man. *Experimental Brain Research* 1991;83:679-682.
 20. Gabriel DA. Shoulder and elbow muscle activity in goal-directed arm movements. *Experimental Brain Research* 1997;116:359-366.
 21. Corcos DM, Gottlieb GL, Latash ML, et al. Electromechanical delay: an experimental artifact. *Journal of Electromyography and Kinesiology* 1992;2:59-68.
 22. Gottlieb GL, Corcos DM, Agarwal GC. Organizing principles for single joint movements: I - A Speed-Insensitive Strategy. *Journal of Neurophysiology* 1989;62(2):342-357.
-