

4.09.99 - Educação Física

A DINÂMICA INVERSA COMO FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO DA DEMANDA MUSCULAR EM EXERCÍCIOS FUNCIONAIS

Heron B. O. Medeiros^{1*}, Gêssica A. Silvano², Marcio O. Nunes³, Heiliane de Brito Fontana⁴

1. Estudante de Educação Física da Universidade Federal de Santa Catarina (CDS-UFSC)
2. Estudante de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Reabilitação (PPGCR-UFSC)
3. Professor do Departamento de Educação Física do Centro Universitário de Brusque (UNIFEBE)
4. Professora do Departamento de Ciências Morfológicas (CCB-USFC)/Orientadora

Resumo

Os exercícios funcionais são caracterizados por movimentos multiarticulares e, por vezes, pelo uso de bandas elásticas como resistência. Devido a essa complexidade, a demanda imposta aos músculos pode não ser evidente, resultando em inferências incorretas e em discordâncias entre o objetivo da prescrição e as adaptações alcançadas. Nesse estudo, descrevemos a utilização da dinâmica inversa no contexto da caminhada lateral com resistência elástica, um exercício comumente utilizado para o fortalecimento dos músculos abdutores e rotadores laterais do quadril. A cinemática 3-D e as forças de reação do solo ($n=36$) e a resistência da banda elástica foram coletadas e os torques articulares do quadril foram calculados por dinâmica inversa. Os resultados demonstram que o uso da caminhada lateral para o fortalecimento dos músculos rotadores laterais do quadril não é apropriado, uma vez que um torque muscular de rotação medial (e não lateral) foi observado para todas as fases do exercício.

Autorização legal: 04113918.2.0000.0121.

Palavras-chave: Biomecânica; Torque; Fortalecimento.

Apoio financeiro: Este trabalho teve o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Trabalho selecionado para a JNIC: UFSC.

Introdução

Os exercícios de fortalecimento são utilizados na área clínica e do treinamento. Para que um exercício de fortalecimento seja eficaz, uma resistência externa em direção oposta à ação dos músculos alvo deve ser imposta. Por exemplo, no exercício de rosca direta de bíceps, em que uma carga é colocada na mão, é intuitivo concluir que a ênfase está direcionada ao fortalecimento dos flexores do cotovelo e que o nível de resistência está intimamente associado à magnitude da carga prescrita (ABOODARDA et al., 2013). No entanto, quando se trata de exercícios funcionais, baseados em movimentos multiarticulares e em fases as quais ambos os pés interagem com o chão, a demanda muscular nos membros inferiores nem sempre é óbvia.

A caminhada lateral com resistência elástica é um exemplo dessa constatação. É um exercício comumente utilizado para o fortalecimento dos músculos rotadores laterais do quadril, e estudos recentes tenham sugerido que o uso da banda elástica no pé pode potencializar esse objetivo (CAMBRIDGE et al., 2012; LEWIS et al., 2018). No entanto, a premissa de que esse exercício cria uma resistência em oposição aos músculos rotadores laterais – requisito essencial para que ocorra o fortalecimento – não pode ser determinada puramente por uma análise qualitativa do movimento e ainda não foi testada experimentalmente.

O uso da dinâmica inversa é uma alternativa experimental interessante para pesquisadores avaliarem a demanda muscular de exercícios funcionais, a partir da determinação de forças e torques causados no exercício. A dinâmica inversa é uma abordagem biomecânica que permite estimar torques articulares a partir de dados cinemáticos e de força de reação do solo, possibilitando a verificação da demanda muscular de maneira objetiva e quantitativa. Tanto a direção do torque resultante interno na articulação (predominantemente produzido por músculos), como a magnitude desse torque podem ser estimados.

Dada a complexidade da caminhada lateral, a ausência de estudos que quantifiquem os torques na articulação do quadril, e a interpretação aparentemente equivocada acerca das demandas musculares desse exercício, o objetivo nesse estudo foi analisar o torque muscular no plano transversal do quadril durante a caminhada lateral com resistência elástica no pé. A hipótese de que esse exercício propicia o fortalecimento dos rotadores mediais do quadril foi testada.

Metodologia

Um estudo experimental de modelamento por dinâmica inversa com medidas repetidas foi desenhado. Participaram 36 sujeitos adultos saudáveis ($24,9 \pm 3,9$ anos; $66,2 \pm 9,4$ kg; $1,72 \pm 0,08$ m). A cinemática e a

força de reação do solo foram coletadas no Laboratório de Biomecânica do Centro de Desportos da Universidade Federal de Santa Catarina durante a execução do exercício de caminhada lateral a partir da cinemática 3-D e de duas plataformas de força triaxial embutidas em uma passarela de madeira (Figura 1).

Para a captura da cinemática foi utilizado oito câmeras infravermelho, além de marcadores reflexivos colocados em trinta e seis pontos anatômicos para a definição de seis segmentos distintos (cabeça, tronco, quadril, coxa, perna e pé) conforme as recomendações da Sociedade Internacional de Biomecânica. Foi realizada uma coleta estática com todos os marcadores e quatro marcadores na banda elástica para fins de calibração. Para as coletas dinâmicas, foram retirados esses quatro marcadores da banda elástica e os marcadores mediais do tornozelo e joelho. A escolha de não usar esses marcadores durante o movimento teve como finalidade minimizar os ruídos no processamento da imagem.



Figura 1 – Execução da caminhada lateral na postura agachada. Da esquerda para a direita da imagem, uma passada válida com as fases de: duplo apoio estreito (DAE), apoio simples (AS), duplo apoio amplo (DAA) e balanço (BL).

A caminhada lateral foi realizada em duas posturas (ereta e agachada), porém descrevemos aqui os resultados para a postura agachada, que é mais frequentemente utilizada. A postura agachada foi definida a partir do controle do ângulo de joelho (60 graus de flexão) por instrução verbal e feedback visual através de um goniômetro antes do início da execução.

A ordem das condições de postura foi aleatória e a cadência e o comprimento do passo foram controlados. A cadência através de um metrônomo a 60 bpm e a passada por feedback visual com pegadas desenhadas no solo (30 a 50 cm) (Figura 1).

Os dados foram coletados pelo software Vicon Nexus e exportados para o MATLAB para processamento. O pré-processamento incluiu a constante da banda elástica que foi determinada experimentalmente a partir de um teste de comprimento-tração (173,7 N/m) e inserida no modelo juntamente com os parâmetros inerciais estimados dos indivíduos (DUMAS; CHÈZE; VERRIEST, 2007). A análise cinemática foi realizada por multicorpos e a análise de dinâmica inversa através das equações de Newton-Euler.

A média do torque do quadril no plano transversal é apresentada para o quadril direito em quatro fases e para os deslocamentos laterais para a esquerda (perna direita como perna de recuo) e para a direita (perna direita como perna de avanço). Diferenças entre o papel da perna como avanço e recuo foram avaliadas através da ANOVA modelo misto ($p < 0,05$) com os fatores sexo e fases da caminhada lateral para a investigação de possíveis interações.

Resultados e Discussão

Os torques musculares no plano transversal do quadril para as diferentes fases do exercício e papéis da perna (avanço ou recuo) são mostrados na Tabela 1. Não houve interação envolvendo o efeito do papel da perna e o sexo ($p > 0,182$), dessa forma os participantes de ambos os sexos foram analisados em um único grupo.

Não houve interação entre o papel da perna e as fases do exercício ($F_{3, 204,384} = 2,087$; $p = 0,103$), assim como não houve efeito do papel da perna ($F_{1, 352,147} = 1,583$; $p = 0,209$). Isso significa que o torque foi similar entre os deslocamentos para esquerda e para a direita. O torque muscular obtido a partir da análise de dinâmica inversa foi de rotação medial. Para todas as fases da caminhada lateral e independentemente do papel da perna, um torque muscular de rotação medial do quadril foi necessário para realizar o exercício.

Tabela 1 – Média (desvio padrão) para os torques do quadril ($N.m.kg^{-1}.m^{-1}$) durante o exercício da caminhada lateral com resistência elástica nos pés para as diferentes fases e papéis desempenhados pela perna ($n=36$).

	Papel de avanço				Papel de recuo			
	DAE	AS	DAA	BL	DAE	AS	DAA	BL
Torque plano transverso	0,13 (0,06)	0,22 (0,07)	0,10 (0,05)	0,11 (0,02)	0,11 (0,04)	0,24 (0,07)	0,12 (0,05)	0,11 (0,03)

Legenda: DAE (Duplo Apoio Estreito); AS (Apoio Simples); DAA (Duplo Apoio Amplo); BL (Balanço). Valores positivos se referem a um torque muscular de rotação medial do fêmur em relação à pelve.

A análise de dinâmica inversa descrita aqui confirma a hipótese desse estudo e evidencia que o entendimento atual acerca da demanda muscular na caminhada lateral ser útil para o fortalecimento dos músculos rotadores laterais é equivocado e requer atenção por parte dos pesquisadores e profissionais que estudam e prescrevem esse exercício. Como pode ser observado na Tabela 1, um torque muscular de rotação medial foi observado inclusive nas fases de duplo apoio com o solo, para as quais não é possível determinar o torque por diagrama de corpo livre, sendo a mensuração das forças de reação do solo e a análise de dinâmica inversa necessárias para que inferências sobre o torque possam ser feitas.

Cambridge et al. (2012) e Lewis et al. (2018) inferiram sobre os torques musculares do quadril com base na ativação muscular mensurada durante a caminhada lateral, afirmando que um torque muscular de rotação lateral está presente e é potencializado quando a banda elástica é posicionada nos pés. Essa afirmação foi baseada em uma maior ativação do glúteo máximo relativa ao tensor da fáscia lata para essa posição. No entanto, inferências sobre o torque através da análise da atividade mioelétrica são problemáticas por vários motivos e no exemplo acima, desconsidera a complexa ação dos músculos do quadril, que atuam em mais de um plano de movimento. Sabe-se também, que os braços de momento dos músculos do quadril no plano transversal dependem do ângulo de flexão do quadril (DELP et al., 1999), e que o glúteo máximo, tipicamente definido como um rotador lateral do quadril com base na posição anatômica, pode contribuir para um torque muscular de rotação medial quando o quadril é flexionado.

A magnitude dos torques articulares durante exercícios com banda elástica em cadeia cinética aberta é dependente do braço de momento da banda elástica (a distância perpendicular do vetor de força até o eixo de interesse na articulação). Sendo assim, um torque muscular de rotação medial era previsto para fase de balanço da caminhada lateral, uma vez que o posicionamento do vetor criado pela banda elástica passa posteriormente ao eixo do quadril no plano transversal. Esse vetor gera um torque externo (uma resistência) no quadril que tende a rodar lateralmente o quadril, exigindo que os músculos rotadores mediais atuem para contrapor esse torque e permitir a execução correta do movimento.

Como dito anteriormente, na fase de duplo apoio com o solo, essa inferência não pode ser feita sem que se conheça as forças de reação do solo. Em um exercício de cadeia cinética fechada, as demandas cinemáticas do movimento podem ser cumpridas frente a uma infinidade de possíveis magnitudes e direções das forças de reação do solo agindo sobre os pés. Em outras palavras, o sujeito pode, com a banda elástica entre as pernas/pés e os pés no chão, relaxar os músculos do quadril e, a partir da interação com o solo, provocar uma força de reação do solo em oposição a direção do vetor da banda elástica. Essa força tenderia a empurrar os pés do sujeito lateralmente (“para fora”) e a resultar em um torque muscular de rotação lateral no quadril. Como o apoio duplo com o solo cria um sistema indeterminado, conclusões acerca das estratégias adotadas e dos torques no quadril só podem ser verificadas a partir de uma análise de dinâmica inversa.

Torques musculares de rotação lateral do quadril não foram encontrados nesse estudo, para nenhum participante e nenhuma fase do exercício. A manutenção de um torque muscular de rotação medial do quadril, para a perna de avanço e recuo e durante todas as fases do exercício, está em consonância com a hipótese formulada para esse estudo e sugere que os participantes se comportaram, no que se refere ao controle do movimento pelos músculos do quadril, de maneira semelhante nas fases de cadeia cinética aberta (fase de apoio simples e balanço) e nas fases de cadeia cinética fechada (duplo apoio estreito e amplo).

Conclusões

A partir da análise de dinâmica inversa durante a caminhada lateral com a resistência elástica no pé, podemos concluir que um torque muscular de rotação medial do quadril é requerido durante todo o ciclo da caminhada lateral. Dessa forma, esse exercício não parece ser útil no fortalecimento dos rotadores laterais do quadril como sugerido na literatura. Ao contrário, nossos resultados sugerem que esse exercício gera uma demanda favorável ao fortalecimento dos músculos rotadores mediais do quadril.

Nesse estudo, foi avaliado o efeito da mudança de sentido no movimento (direita e esquerda) na magnitude do torque de rotação do quadril. Os resultados mostram que os torques para a perna de avanço e para a perna de recuo são semelhantes quando comparados em uma mesma fase de movimento.

Esses achados são provenientes da dinâmica inversa, uma ferramenta útil na determinação da demanda muscular em exercícios funcionais. No exemplo da caminhada lateral descrito nesse estudo, os resultados claramente demonstram uma discordância entre a demanda muscular inferida na clínica e na

literatura da área e a demanda verificada experimentalmente. Por conseguinte, a presença de uma sobrecarga aos músculos rotadores mediais – e não laterais – deve ser levada em consideração na prescrição da caminhada lateral em programas de reabilitação e treinamento físico.

Referências bibliográficas

ABOODARDA, S. J. et al. Resultant muscle torque and electromyographic activity during high intensity elastic resistance and free weight exercises. **European Journal of Sport Science**, v. 13, n. 2, p. 155–163, mar. 2013.

CAMBRIDGE, E. D. J. et al. Progressive hip rehabilitation: The effects of resistance band placement on gluteal activation during two common exercises. **Clinical Biomechanics**, v. 27, n. 7, p. 719–724, ago. 2012.

DELP, S. L. et al. Variation of rotation moment arms with hip flexion. **Journal of Biomechanics**, v. 32, n. 5, p. 493–501, maio 1999.

DUMAS, R.; CHÈZE, L.; VERRIEST, J. P. Adjustments to McConville et al. and Young et al. body segment inertial parameters. **Journal of Biomechanics**, v. 40, n. 3, p. 543–553, 2007.

LEWIS, C. L. et al. Hip-Muscle Activity in Men and Women During Resisted Side Stepping With Different Band Positions. **Journal of Athletic Training**, v. 53, n. 11, p. 1071–1081, 2018.