

La coactivación del bíceps femoral limita la fuerza máxima isométrica de extensión de rodilla en ciclistas de ruta

DAVID GARCÍA-LÓPEZ^a, GUILHERME BRESCIANI^b, SALVADOR CABEZA DE VACA^c, NURIA GARATACHEA^b
Y JOSÉ A. DE PAZ^b

^aFacultad de Ciencias de la Salud. Universidad Europea Miguel de Cervantes. Valladolid. España.

^bDepartamento de Fisiología. Universidad de León. León. España.

^cFederación Andaluza de Ciclismo. Sevilla. España.

RESUMEN

Introducción y objetivos: El objeto del presente estudio fue analizar la coactivación antagonista (bíceps femoral) durante una contracción máxima isométrica de extensión unilateral de rodilla, en ciclistas de ruta, así como su relación con la activación agonista (recto femoral, vasto medial y vasto lateral) y la fuerza manifestada. La activación de los músculos gastrocnemios también fue monitorizada.

Métodos: Dieciséis ciclistas federados efectuaron una prueba máxima de extensión isométrica de rodilla. Durante los 5 s de duración del test, llevado a cabo con la pierna dominante, se monitorizó la actividad electromiográfica (EMG) de 6 músculos del tren inferior, además de la fuerza isométrica manifestada.

Resultados: La actividad EMG media (EMG_{med}) del bíceps femoral supuso un 37,4% de la EMG_{med} promediada de los 3 agonistas. Por su parte, la EMG_{med} promediada de los gastrocnemios supuso un 18,2% de la EMG_{med} promediada de los agonistas. Analizando por separado la EMG_{med} de cada uno de los 3 músculos agonistas, observamos que este parámetro de activación fue estadísticamente superior en el recto femoral en comparación con el vasto medial y el vasto lateral. La EMG_{med} del bíceps femoral se mostró inversamente proporcional a la fuerza isométrica máxima. Sin embargo, la activación del resto de músculos, tanto media como máxima, no mostró relación alguna con la fuerza.

Conclusiones: La activación antagonista limita la fuerza máxima isométrica de extensión de rodilla en ciclistas de ruta. Tanto este hecho como la excesiva activación del recto femoral pueden tener relación con las diferencias biomecánicas existentes entre el pedaleo, el gesto propio de la modalidad practicada por los sujetos, y la extensión de rodilla en la máquina.

PALABRAS CLAVE: Coactivación antagonista. Electromiografía de superficie. Fuerza máxima isométrica. Extensión de rodilla. Ciclistas de ruta.

ABSTRACT

Introduction and objectives: The aim of this study was to analyze antagonist coactivation (biceps femoris) during maximal isometric leg extension in road cyclists, and its relationship with agonist activation (rectus femoris, medial vastus, lateral vastus) and the force developed. Gastrocnemius activation was also monitored.

Methods: Sixteen road cyclists carried out a maximum unilateral isometric contraction on a leg-extension machine, using their dominant leg. The test lasted 5 seconds and the isometric force and electromyographic (EMG) activity of 6 lower limb muscles was monitored.

Results: Antagonist and gastrocnemius average EMG activity (EMG_{med}) was 37.4% and 18.2% of the agonist EMG_{med} respectively. Analysis of the EMG_{med} of each of the 3 agonist muscles separately showed that the rectus femoris EMG_{med} was significantly higher than the vastus medialis and vastus lateralis EMG_{med} . Biceps femoris EMG_{med} was negatively correlated with maximal isometric force. However, neither agonist nor gastrocnemius activation was related to the force developed.

Conclusions: Antagonist coactivation limits the maximum isometric force on knee extension in road cyclists. This finding and excessive rectus femoris activation could be related to biomechanical differences between pedaling – the movement practiced by cyclists – and leg extension on the machine.

KEY WORDS: Antagonist coactivation. Surface EMG. Maximal isometric force. Leg extension. Road cyclists.

INTRODUCCIÓN

La activación de los músculos antagonistas durante una acción determinada es un hecho común¹, principalmente cuando la contracción agonista es fuerte y/o rápida², y cuando los sujetos no están acostumbrados a la tarea en cuestión³. Esta coactivación puede colaborar con los ligamentos en la estabilización articular durante contracciones fuertes², y es en cierto modo necesaria para prevenir daños potenciales⁴. Sin embargo, todo exceso de coactivación antagonista es claramente perjudicial respecto a la producción de fuerza máxima, puesto que, además de suponer una tensión aplicada en sentido contrario al pretendido⁵, impide, por inhibición recíproca, la completa activación agonista⁶. Macaluso et al⁷ han demostrado recientemente que la pérdida de fuerza de extensión de rodilla que acontece con el paso de los años no sólo tiene su causa en una disminución de la masa muscular, sino también en una mayor coactivación antagonista. Sin embargo, son varios los autores que han demostrado que la coactivación antagonista puede reducirse con el entrenamiento^{8,9}.

Por otro lado, parece que los músculos que actúan sobre la articulación de la rodilla siguen patrones de activación diferentes en función del tipo de cadena cinética que conlleve la tarea. De este modo, los distintos músculos del cuádriceps se activan de forma más homogénea durante una contracción máxima isométrica en máquina de extensión de rodilla (cadena cinética abierta) que en una contracción máxima isométrica en prensa (cadena cinética cerrada)¹⁰. Dado que el pedaleo es uno de los ejemplos más claros de cadena cinética cerrada, cabe pensar que la activación muscular de agonistas, antagonistas y sinergistas no sea la más eficaz en sujetos acostumbrados a este gesto (ciclistas) cuando se les solicita una contracción máxima isométrica en una máquina de extensión de rodilla.

De este modo, el objetivo del presente estudio fue analizar la coactivación antagonista (bíceps femoral [BF]) durante una contracción máxima isométrica de extensión unilateral de rodilla en ciclistas de ruta, así como su relación con la activación agonista (recto femoral [RF], vasto medial [VM] y vasto lateral [VL]) y la fuerza manifestada.

MÉTODOS

Sujetos

En el estudio participaron 16 varones, ciclistas de ruta. Todos ellos tomaban parte regularmente en competiciones

de ámbito nacional, en categoría junior. Ninguno de ellos tenía experiencia con el trabajo en máquina de extensión de rodilla. Se informó previamente a todos los sujetos de las características y objetivos del estudio en el que iban a participar, al que se adscribieron voluntariamente.

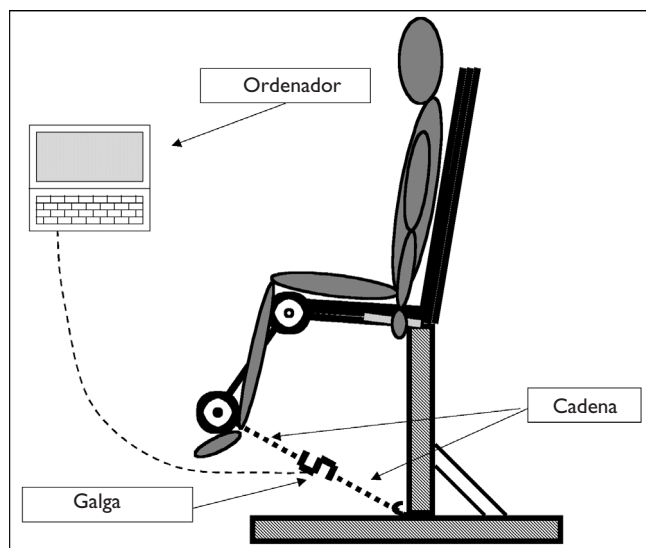
Procedimientos

La fase experimental del estudio se llevó a cabo en 2 sesiones de laboratorio, con 72 h de separación entre ambas. Durante la primera sesión se obtuvieron los datos descriptivos, incluyendo la edad, la altura (estadímetro Detecto D52[®], Estados Unidos), peso (báscula Cobol 20[®], Barcelona, España) y porcentaje de grasa corporal, estimado mediante la medición de 3 pliegues cutáneos (plicómetro Lafayette Instruments[®], Estados Unidos), mediante la ecuación desarrollada por Jackson y Pollock¹¹. Una vez finalizada la valoración antropométrica, los individuos realizaron un calentamiento estándar de 10 min de duración, para posteriormente sentarse en la máquina de extensión de rodilla (Salter[®], Barcelona, España), cara al ajuste del respaldo (90° de angulación de cadera) y del rodillo (90° de angulación de rodilla); éste estaba en contacto con el extremo distal de la tibia, lo que permitía a la articulación del tobillo una posición neutra. En dicha posición, cada uno de los sujetos realizó 3 contracciones máximas isométricas de extensión unilateral (pierna dominante) de rodilla. Estos intentos, de 5 s de duración y separados entre sí por 3 min, tenían el objetivo de familiarizar a los individuos con el test.

Tres días después, los sujetos regresaron al laboratorio para repetir el test de extensión máxima isométrica de rodilla, esta vez con el registro de la fuerza y de la actividad electromiográfica (EMG) de 6 músculos del miembro inferior dominante: RF, VM, VL, BF, gastrocnemio medial (GM) y gastrocnemio lateral (GL). Previamente a la fase de calentamiento (similar al llevado a cabo en la primera sesión de laboratorio), y con cada sujeto sentado, se procedió a la preparación de la piel (afeitado y limpieza) y a la colocación de los electrodos de superficie (Ag/AgCl, Skintact[®], Austria), para lo cual se solicitaba al individuo una contracción isométrica de baja intensidad, cara a la localización anatómica del vientre de cada uno de los músculos que iban a someterse a estudio¹². Cada par de electrodos, con una separación interelectrodo de 2 cm¹³, se colocó en sentido longitudinal a la dirección de las fibras musculares, de acuerdo con la literatura médica específica¹⁴. El electrodo de referencia (uno por cada músculo) se situó en un área neutral.

Figura 1

Esquema del test de fuerza máxima isométrica en máquina de extensión de rodilla.



Una vez colocados los electrodos y concluido el período de calentamiento, cada uno de los sujetos realizó el test de fuerza máxima isométrica unilateral en la misma máquina de extensión de rodilla en la que tuvo lugar la familiarización. Así, durante los 5 s de duración del test se registró tanto la actividad EMG de los músculos seleccionados (ME6000®, Mega Electronics, Kuopio, Finlandia), como la fuerza isométrica de extensión de rodilla (galga extensiométrica Globus Ergo Meter®, Globus, Codogno, Italia) (fig. 1). La prueba se repitió en 2 ocasiones, y para el análisis se consideró aquella en la que se obtuvo un mayor valor de fuerza máxima. Así, del mejor de los intentos se tomó en cuenta el valor de fuerza isométrica máxima ($FI_{m\acute{a}x}$) y media (FI_{med}); este último se calculó a través de la integral del área existente bajo la curva fuerza-tiempo.

El análisis de la actividad EMG correspondiente a los 5 s del test seleccionado se llevó a cabo a través de un software específico (MegaWin V 2.21, Mega Electronics, Kuopio, Finlandia). De esta manera, la señal EMG cruda se promedió para la obtención de la amplitud media (EMG_{med}). Dicha señal cruda se normalizó mediante la raíz cuadrática,

para la obtención del pico máximo de activación ($EMG_{m\acute{a}x}$).

Análisis estadístico

La análisis estadístico de la actividad EMG se llevó a cabo mediante un ANOVA de una vía, utilizando el test de Bonferroni a posteriori, para establecer las diferencias concretas entre agonistas (promedio de la actividad EMG de RF, VM y VL), antagonistas (BF) y gastrocnemios (promedio de la actividad EMG de GM y GL). Además, mediante otro ANOVA, con el mismo análisis post hoc, se estudiaron las diferencias entre cada uno de los 6 músculos por separado. El estudio de las correlaciones se llevó a cabo mediante el test de Pearson. Todas las pruebas estadísticas se realizaron con la ayuda del software SPSS® 13.0 (Chicago, Estados Unidos), y se mantuvo un nivel de significación de $p < 0,05$. Todos los valores presentados en texto y tablas aparecen como media \pm desviación estándar (DE).

RESULTADOS

Tanto los valores descriptivos de la muestra (edad, talla, masa y porcentaje de grasa corporal) como el valores de $FI_{m\acute{a}x}$ y FI_{med} se exponen en la tabla I.

Como se puede observar en la figura 2, la EMG_{med} de los músculos agonistas durante los 5 s de la prueba fue estadísticamente superior ($p < 0,01$) a la EMG_{med} de antagonistas y gastrocnemios. De esta manera, la EMG_{med} del BF supuso un 37,4% de la EMG_{med} promediada de los 3 agonistas (RF, VM y VL). Por su parte, la EMG_{med} promediada de los gastrocnemios (GM y GL) supuso un 18,2% de la EMG_{med} promediada de los agonistas. Si se compara la EMG_{med} de cada uno de los 3 músculos agonistas por separado, se observa que este parámetro de activación fue estadísticamente superior ($p < 0,01$) en el RF en comparación con VM y VL.

Observando el pico de amplitud ($EMG_{m\acute{a}x}$) (fig. 3) se encuentra un comportamiento parecido al mostrado por la EMG_{med} . Así, los agonistas muestran una $EMG_{m\acute{a}x}$ estadísticamente superior ($p < 0,01$) a antagonistas y gastrocnemios.

Tabla I

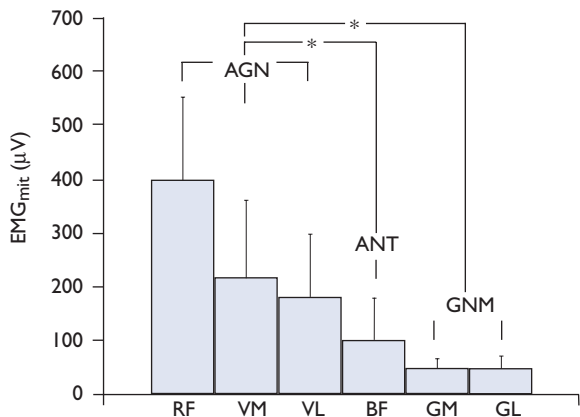
Valores descriptivos de la muestra, fuerza isométrica máxima ($FI_{m\acute{a}x}$) y fuerza isométrica media (FI_{med})

Edad (años)	Talla (cm)	Masa (kg)	Grasa corporal (%)	$FI_{m\acute{a}x}$ (N)	FI_{med} (N)
16,9 \pm 2,2	173,6 \pm 5,5	65,8 \pm 6,6	9,06 \pm 0,7	528,5 \pm 190,1	407,9 \pm 163,5

Valores expresados como media \pm desviación estándar.

Figura 2

EMG_{med} (μV) de cada uno de los 6 músculos estudiados, agrupados en agonistas (AGN), antagonista (ANT) y gastrocnemios (GNM). *p < 0,01.



BF: bíceps femoral; GL: gastrocnemio lateral; GM: gastrocnemio medial; RF: recto femoral; VL: vasto lateral; VM: vasto medial.

Estos últimos, al contrario de lo que ocurría con la EMG_{med}, alcanzaron una EMG_{máx} superior a la de los antagonistas, si bien esta diferencia no alcanzó significación estadística. Analizando el pico de activación de cada uno de los 3 agonistas por separado, encontramos que la EMG_{máx} del RF fue estadísticamente superior ($p < 0,01$) a la EMG_{máx} del VL.

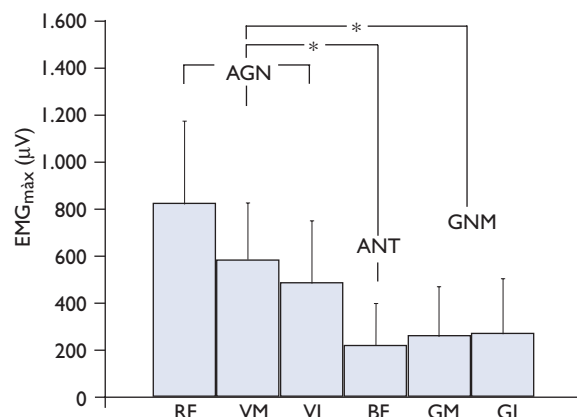
Respecto al estudio de las correlaciones, la EMG_{med} del BF mostró una correlación significativa ($p < 0,05$; $r = -0,58$) con la FI_{máx}. La activación EMG del resto de músculos, tanto EMG_{med} como EMG_{máx}, no mostró relación alguna con la FI_{med} o FI_{máx}. Al comparar la activación de los distintos músculos entre sí, encontramos una correlación significativa en lo que respecta a ambos gastrocnemios, tanto en EMG_{med} ($p < 0,05$, $r = 0,59$) como en EMG_{máx} ($p < 0,01$; $r = 0,83$). Lo mismo ocurre con el VM y el VL ($p < 0,05$, $r = 0,50$, y $p < 0,05$, $r = 0,53$ para EMG_{med} y EMG_{máx}, respectivamente). Por último, llama la atención la correlación significativa que muestra la activación del VM con la activación del BF, tanto en EMG_{med} ($p < 0,05$, $r = 0,62$) como en EMG_{máx} ($p < 0,05$, $r = 0,56$).

DISCUSIÓN

La activación de los músculos agonistas no mostró relación alguna con la FI_{máx} o FI_{med} desempeñada por los sujetos. Son varios los autores que no encuentran una relación lineal entre la FI de extensión de rodilla y la activación de los músculos del cuádriceps^{15,16}. En el presente estudio, el resultado

Figura 3

EMG_{máx} (μV) de cada uno de los 6 músculos estudiados, agrupados en agonistas (AGN), antagonista (ANT) y gastrocnemios (GNM). *p < 0,01.



BF: bíceps femoral; GL: gastrocnemio lateral; GM: gastrocnemio medial; RF: recto femoral; VL: vasto lateral; VM: vasto medial.

más llamativo es la correlación negativa encontrada entre la EMG_{med} del músculo antagonista (BF) y el valor de FI_{máx}. Esto viene a indicar que, en ciclistas de ruta, la FI_{máx} de extensión de rodilla está limitada por la activación antagonista. Para encontrar una explicación a este hecho es necesario analizar la mecánica del gesto solicitado (extensión de rodilla) y del gesto propio de la modalidad deportiva practicada de forma asidua por los sujetos (ciclismo). El BF tiene dos cabezas, una de ellas monoarticular, que actúa como flexor de la rodilla, y una biarticular, que funciona como agonista del cuádriceps en algunos ejercicios como el pedaleo¹⁷. De hecho, Takaishi et al¹⁸ demostraron que ciclistas experimentados son capaces de activar más el BF durante el pedaleo que sujetos no ciclistas, lo que contribuye a aliviar el esfuerzo de los extensores de la rodilla durante este gesto. En la misma línea, Lutz et al¹⁹ demostraron una mayor activación de los isquiotibiales en tareas de cadena cinética cerrada (pedaleo, *squat*, etc.), en comparación con tareas de cadena cinética abierta (extensión de rodilla). Por lo tanto, es lógico pensar que los ciclistas, acostumbrados a un gesto en el que los músculos isquiotibiales participan de forma activa, tiendan a activar en exceso este grupo muscular durante una tarea aparentemente parecida pero biomecánicamente diferente (extensión de rodilla). Esta idea se ve reforzada por el hecho de que la correlación negativa entre fuerza máxima manifestada y activación antagonista, que muestran nuestros resultados no se haya encontrado en una muestra futbolistas, también sin experiencia en el gesto de extensión unilateral de rodilla en máquina¹.

Al igual que ocurre con otros aspectos de la señal EMG, la coactivación antagonista puede analizarse de muchas maneras. Esto hace difícil comparar nuestros valores con los obtenidos por otros autores. En muchos trabajos la activación antagonista se trata como porcentaje de la activación máxima que el músculo en concreto presenta cuando actúa como agonista⁷. El hecho de que en nuestro caso no se realizase una prueba máxima de flexión de rodilla, hace imposible presentar los datos de dicha forma. Teniendo esto en cuenta, los ciclistas participantes en el presente estudio mostraron una coactivación antagonista (relativizada con la activación de los agonistas) mayor a la mostrada por algunos estudios. En este sentido, Alkner et al²⁰, que también utilizaron un ángulo de flexión de rodilla de 90°, observaron una activación del BF equivalente al 12,8% de la activación promediada de los extensores de la rodilla.

Centrándonos en la activación de los 3 agonistas estudiados, encontramos que la EMG_{med} del RF fue estadísticamente superior a la de VM y VL, respectivamente. Brindle et al²¹, que evaluaron el mismo gesto en chicas estudiantes sin experiencia en la extensión máxima isométrica de rodilla, también encontraron una mayor activación del RF, si bien la diferencia con el VM no fue tan acusada como en nuestro caso. Además, en este estudio se utilizó una angulación de rodilla de 120°. Sin embargo, otros autores observan que el músculo más activo en este tipo de tarea no es el RF, sino el VM²⁰. De nuevo, el gesto propio de modalidad deportiva de los sujetos, el pedaleo, puede tener alguna relación con esta activación "extra" del RF. Hug et al²² estudiaron recientemente, en ciclistas profesionales, el patrón de activación de distintos músculos del tren inferior durante el pedaleo, constatando que el RF, VL y BF son los músculos más activos durante dicho gesto. Bien es cierto que los autores observan también una gran heterogeneidad entre indi-

viduos, principalmente en lo que concierne a activación del RF.

La coactivación antagonista, necesaria para mantener la estabilidad de la articulación, se convierte en contraproducente (desde el punto de vista de la fuerza manifestada por la acción agonista) cuando supera un cierto límite, como demuestran nuestros resultados. La búsqueda de estabilidad articular puede explicar la correlación encontrada entre la activación del VM y el BF; mientras que el primero ocupa la zona más medial del conjunto del cuádriceps, el BF es músculo más lateral de los tres isquiotibiales. Esta activación paralela de músculos anatómicamente opuestos contribuiría a mantener la estabilidad articular en una acción de elevada fuerza. Sin embargo, el mayor pico de activación que mostraron los gastrocnemios en comparación con el pico de activación del BF no parece tener relación con la estabilidad. Teniendo en cuenta que este pico de activación se dio en el último segundo del test, es lógico pensar que la fatiga específica hizo a los sujetos perder concentración, lo que condujo a la excesiva activación de músculos accesorios en este gesto, como son los gastrocnemios, que no intervienen de forma directa.

En resumen, se puede concluir que la coactivación del BF limita la $FI_{máx}$ unilateral de la extensión de la rodilla en ciclistas de ruta, cuantificada en un ángulo de flexión de rodilla de 90°. Este hecho, unido a que el RF se mostró como el músculo agonista más activo, puede explicarse por las características biomecánicas del gesto al que los sujetos están acostumbrados: el pedaleo. Tanto el análisis de la activación muscular de agonistas y antagonistas durante este gesto pero con distintos ángulos de rodilla, como la posible reducción de la coactivación antagonista por medio de entrenamientos específicos, son interesantes líneas de investigación para futuros trabajos.

Bibliografía

1. De Vito G, McHugh D, Macaluso A, Riches PE. Is the coactivation of biceps femoris during isometric knee extension affected by adiposity in healthy young humans? *J Electromyogr Kinesiol.* 2003;13:425-31.
2. Baratta R, Solomonow M, Zhou BH, Letson D, Chuinard R, D'Ambrosia R. Muscular coactivation. The role of the antagonist musculature in maintaining knee stability. *Am J Sports Med.* 1988;16:113-22.
3. Person RS. Electromyographic investigations of coordination of the antagonistic muscles in development of motor habit. *Pavlov Journal of Higher Nervous Activity.* 1958;8:13-23.
4. Ebenbichler GR, Kollmitzer J, Glockler L, Bochdansky T, Kopf A, Fialka V. The role of the biarticular agonist and cocontracting antagonist pair in isometric muscle fatigue. *Muscle Nerve.* 1998;21:1706-13.

5. Sale DG. Neural adaptation to strength training. En: Komi PV, editor. *Strength and power in sport*. Oxford: The Encyclopaedia of Sports Medicine; Blackwell Science; 1992. p. 261.
6. Tyler AE, Hutton RS. Was Sherrington right about co-contractions? *Brain Res*. 1986;370:171-5.
7. Macaluso A, Nimmo MA, Foster JE, Cockburn M, McMillan NC, De Vito G. Contractile muscle volume and agonist-antagonist coactivation account for differences in torque between young and older women. *Muscle Nerve*. 2002;25:858-63.
8. Carolan B, Cafarelli E. Adaptations in coactivation after isometric resistance training. *J Appl Physiol*. 1992;73:911-7.
9. Hakkinen K, Kallinen M, Izquierdo M, Jokelainen K, Lassila H, Malkia E, et al. Changes in agonist-antagonist EMG, muscle CSA, and force during strength training in middle-aged and older people. *J Appl Physiol*. 1998;84:1341-9.
10. Stensdotter AK, Hodges PW, Mellor R, Sundelin G, Hager-Ross C. Quadriceps activation in closed and in open kinetic chain exercise. *Med Sci Sports Exerc*. 2003;35:2043-7.
11. Jackson AS, Pollock ML. Practical assessment of body composition. *Physician Sportsmed*. 1985;13:76-90.
12. Gray H. *Gray's anatomy: a facsimile*. Rochester Kent: Grange Books; 2001.
13. De Luca CJ. The use of surface electromyography in biomechanics. *J Appl Biomech*. 1997;13:135-63.
14. Rainoldi A, Melchiorri G, Caruso I. A method for positioning electrodes during surface EMG recordings in lower limb muscles. *J Neurosci Methods*. 2004;134:37-43.
15. Bell DG. The influence of air temperature on the EMG/force relationship of the quadriceps. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1993;67:256-60.
16. Eloranta V. Patterning of muscle activity in static knee extension. *Electromyogr Clin Neurophysiol*. 1989;29:369-75.
17. Sahaly R, Vandewalle H, Driss T, Monod H. Surface electromyograms of agonist and antagonist muscles during force development of maximal isometric exercises—Effects of instruction. *Eur J Appl Physiol*. 2003;89:79-84.
18. Takaishi T, Yamamoto T, Ono T, Ito T, Moritani T. Neuromuscular, metabolic, and kinetic adaptations for skilled pedaling performance in cyclists. *Med Sci Sports Exerc*. 1998;30:442-9.
19. Lutz GE, Palmitier RA, An KN, Chao EY. Comparison of tibiofemoral joint forces during open-kinetic-chain and closed-kinetic-chain exercises. *J Bone Joint Surg Am*. 1993;75:732-9.
20. Alkner BA, Tesch PA, Berg HE. Quadriceps EMG/force relationship in knee extension and leg press. *Med Sci Sports Exerc*. 2000;32:459-63.
21. Brindle TJ, Nyland J, Ford K, Coppola A, Shapiro R. Electromyographic comparison of standard and modified closed-chain isometric knee extension exercises. *J Strength Cond Res*. 2002;16:129-34.
22. Hug F, Bendahan D, Le Fur Y, Cozzone PJ, Grelot L. Heterogeneity of muscle recruitment pattern during pedaling in professional road cyclists: a magnetic resonance imaging and electromyography study. *Eur J Appl Physiol*. 2004;92:334-42.