

Ángulo óptimo articular y ejercicio: bases y aplicaciones

Optimum Joint Angle and Exercise: Foundations and Applications

PABLO ANTONIO RUBIO-SOBRINO

RAÚL RODRÍGUEZ-CASARES

XAVIER AGUADO

LUIS M. ALEGRE

Grupo de Biomecánica Humana y Deportiva

Universidad de Castilla-La Mancha (Toledo, España)

Correspondencia con autor

Luis M. Alegre

luis.alegre@uclm.es

Resumen

El ángulo óptimo se refiere a la posición articular en la que se produce el pico máximo de momento de fuerza, dentro de la curva ángulo-momento articular. Este parámetro puede utilizarse para estimar las modificaciones en la curva fuerza-longitud de un grupo muscular. El ángulo óptimo puede ser obtenido a partir de medidas en tests isométricos o dinámicos, y esto debe ser tenido en cuenta a la hora de establecer comparaciones. El ángulo óptimo puede ser modificado tanto de forma aguda como crónica. Los principales factores que lo modifican son la intensidad y el volumen del ejercicio, la longitud muscular, el modo de contracción y la velocidad de contracción. La capacidad para evaluar y modificar el ángulo óptimo puede utilizarse en programas de prevención de lesiones musculares, especialmente en deportes de equipo como el fútbol. Esta revisión analiza y discute los estudios que se encuentran en la bibliografía relacionados con este tema.

Palabras clave: relación fuerza-longitud muscular, sarcomerogénesis, longitud de fascículos, lesión muscular, isocinético, biomecánica

Abstract

Optimum Joint Angle and Exercise: Foundations and Applications

The optimum angle refers to the joint position at which the maximum peak occurs at the moment of force within the joint angle-time curve. This parameter can be used to estimate changes in the force-length curve of a muscle group. The optimum angle can be obtained from measurements in isometric and dynamic tests, and this should be taken into account when making comparisons. The optimum angle can be altered both acutely and chronically. The main factors that modify it are the intensity and volume of exercise, muscle length, contraction mode and velocity of contraction. The ability to evaluate and modify the optimum angle can be used in programmes for the prevention of muscle injuries, especially in team sports like football. This review examines and discusses the studies found in the literature related to this topic.

Keywords: force-muscle length ratio, sarcomerogenesis, fascicle length, muscle injury, isokinetic, biomechanics

Definición y concepto

El ángulo óptimo es definido como la posición articular donde se alcanza el pico máximo de momento de fuerza (Brockett, Morgan, & Proske, 2001). Dentro de la bibliografía científica internacional se alude a este concepto como “optimum angle” y “angle of peak torque”. El ángulo óptimo se refiere a la posición articular, y se utiliza para conseguir una referencia externa del grado de estiramiento del complejo músculo-tendón. Sin embargo, este no debe confundirse con la longitud muscular óptima, que expresa la distancia donde se produce la máxima tensión de una fibra y/o

un sarcómero medida a velocidad igual a cero. El ángulo óptimo surge de la contribución del complejo músculo-tendón y la longitud óptima, y en el caso del sarcómero, expresa la tensión generada por la interacción de los puentes cruzados, en concreto, la distancia donde se produce la mejor superposición de actina y miosina. En la fibra debe añadirse la contribución de los elementos elásticos que desplazan la tensión total (tensión activa más tensión pasiva) hacia longitudes musculares más largas (*fig. 1*).

A nivel del músculo completo, la arquitectura muscular afecta a la longitud óptima. En dos músculos

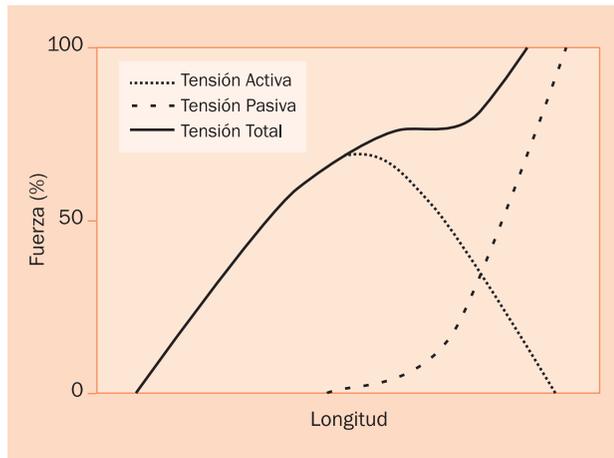


Figura 1

Relación longitud-tensión de una fibra. La tensión total sería la suma de la tensión pasiva y la tensión activa

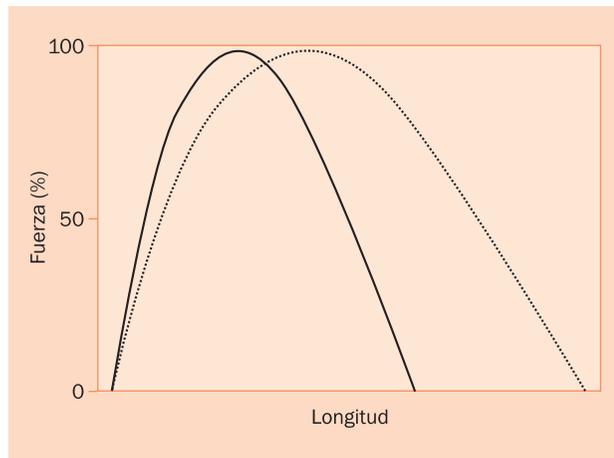


Figura 2

Relación longitud-tensión de fibras con distintas longitudes de fascículo. La línea continua pertenece a un músculo con fibras cortas. La línea punteada se corresponde a un músculo con fascículos más largos

con las mismas áreas de sección transversal y ángulos de pennación, el que posee mayor longitud de fascículos tendrá mayor rango de movimiento activo y alcanzará su longitud óptima a longitudes musculares mayores (Lieber & Friden, 2000) (fig. 2). Los elementos elásticos en serie configuran una curva longitud-tensión más ancha. Esto es debido a que permiten el acortamiento a expensas de su deformación por lo que aumentan el rango funcional y desplazan la longitud óptima hacia longitudes musculares más grandes (Lieber & Friden, 2000). En situaciones dinámicas de medición, el ángulo se desplaza

hacia longitudes musculares más cortas según aumenta la velocidad de extensión de rodilla (Kawakami, Kubo, Kanehisa, & Fukunaga, 2002) por la deformación de los elementos elásticos.

La práctica deportiva a largo plazo puede generar modificaciones de la estructura del músculo y en la rigidez del tendón que pueden incidir en la manifestación del ángulo óptimo. Han sido descritas longitudes óptimas distintas para el recto femoral en función de la especialidad deportiva (Herzog, Guimaraes, Anton, & Carter-Erdman, 1991). Por ejemplo, Savelberg y Meijer (2003) publicaron que los corredores habituales produjeron el máximo momento de extensores de rodilla con una diferencia de 4° hacia mayores longitudes musculares que los ciclistas. Más recientemente, Ullrich y Brüeggemann (2008) encontraron que no existían diferencias para el cuádriceps entre deportistas de carrera de resistencia, ciclistas y jugadores de tenis. Sin embargo Brughelli, Cronin y Nosaka (2010) obtuvieron de sus mediciones ángulos óptimos equivalentes a mayores longitudes musculares de flexores y extensores de rodilla en jugadores de fútbol australiano comparados con ciclistas. Las diferencias entre estos estudios pueden provenir de que no utilizaron la misma metodología de medición. Aún así, muestran que es posible determinar la longitud muscular de forma externa y parecen corroborar que la especialidad deportiva condiciona el ángulo óptimo.

Metodologías de medición del ángulo óptimo

Las articulaciones más estudiadas en la bibliografía son el codo, la rodilla y el tobillo. Básicamente, se han documentado dos métodos para la determinación de este ángulo mediante la utilización de dinamómetros. Con el primero de ellos el ángulo óptimo se obtiene mediante contracciones isométricas en ángulos concretos y el segundo se basa en acciones dinámicas en todo el rango de movimiento. Para el cálculo del ángulo se han utilizado principalmente ajustes polinómicos a partir de varias repeticiones, ya que la obtención del ángulo a partir de una sola contracción presenta una baja reproducibilidad. El valor del ángulo óptimo será distinto dependiendo del modo de contracción elegido para calcularlo. El empleo de contracciones isométricas requiere utilizar gran cantidad de tiempo para la valoración, además de ser menos específico. Por otro lado, la utilización de contracciones dinámicas es más rápida y posee un mayor componente de transferencia, aunque se debe tener en cuenta que la

medición estará influida por las características no sólo del componente contráctil, sino de los elementos elásticos en series y en paralelo. El empleo de velocidades altas de contracción isocinética implica que el ángulo se desplace hacia longitudes musculares más cortas y posiciones articulares más extendidas debido a la contribución del tendón (Kawakami et al., 2002).

Mecanismos y factores del cambio del ángulo óptimo

El ángulo óptimo puede ser modificado, y en este punto se explican los factores responsables de los cambios agudos y crónicos producidos por el ejercicio físico (fig. 3).

Daño muscular y cambio inmediato

El daño muscular es una alteración a nivel de las estructuras de la fibra y del sarcómero, e implica un cambio en las propiedades mecánicas del músculo completo. Aquí nos referiremos al “cambio inmediato” como el producido por una sola sesión de ejercicio. Con respecto al ángulo óptimo se produce un desplazamiento del pico de momento de fuerza articular hacia mayores longitudes musculares (desplazamiento hacia la derecha de la curva longitud-tensión). Esto se vincula con mecanismos periféricos relacionados con la pérdida de la capacidad de producir tensión activa, daño en el sistema de excitación-acoplamiento, al aumento de la tensión pasiva y/o al estallido del sarcómero (Gregory, Morgan, Allen, & Proske, 2007; Morgan & Allen, 1999; Philippou, Bogdanis, Nevill, & Maridaki, 2004; Prasartwuth, Allen, Butler, Gandevia, & Taylor, 2006; Proske & Morgan, 2001). Por ello, el cambio en el ángulo óptimo ha sido utilizado como indicador de daño muscular (Proske & Morgan, 2001).

Los factores que pueden inducir mayor cantidad de cambio del ángulo óptimo por daño muscular son la longitud muscular, el modo de contracción, la intensidad, el volumen y la velocidad.

- En cuanto a la longitud muscular, en los estudios de daño muscular y ángulo óptimo los ejercicios que han utilizado una longitud muscular larga o rama descendente de la curva longitud-tensión han mostrado más magnitud de cambio en grados, tanto en la musculatura de la rodilla (Bowers, Morgan, & Proske, 2004) como en la del codo (Philippou et al., 2004; Prasartwuth et al., 2006). Además, existen evidencias que muestran que la aplicación

de ejercicios de carácter isométrico en longitudes musculares largas induce daño muscular que puede ocasionar un cambio en el ángulo óptimo, reduciendo el momento articular con respecto a la línea base (Philippou et al., 2004). La aplicación de contracciones isométricas en longitudes musculares largas implica una reducción del momento de fuerza mayor que en longitudes musculares cortas (Philippou, Maridaki, & Bogdanis, 2003), debido a la modificación de la longitud óptima que implica daño muscular (Gregory et al., 2007).

- En cuanto al modo de contracción, la contracción excéntrica, con una mayor tensión y menor número de fibras activadas, produce mayor daño muscular que otros tipos de contracción (Brughelli & Cronin, 2007). Recientemente, Yeung y Yeung (2008) obtuvieron diferencias significativas en el ángulo óptimo de los extensores de rodillas con ejercicio excéntrico y modificaciones no significativas en modo concéntrico, sin caídas del momento de fuerza de forma significativa.
- Para el volumen e intensidad del ejercicio, los trabajos sobre daño muscular muestran claramente desplazamientos del ángulo óptimo hacia mayores longitudes musculares con volúmenes e intensidades altos (Bowers et al., 2004; Prasartwuth et al., 2006).
- Los marcadores indirectos de daño muscular muestran aumentos conforme crece la velocidad de contracción (Chapman, Newton, Sacco, & Nosaka, 2006). Con altos volúmenes de repeticiones se aumenta el daño a velocidades altas, por lo que la fatiga podría enmascarar el efecto de la velocidad (Chapman, Newton, McGuigan, & Nosaka, 2008).

El cambio inmediato en el ángulo óptimo, tomando a éste como indicador del daño muscular, es distinto entre grupos musculares. C. H. Chen et al. (2011) han demostrado cómo una metodología idéntica aplicada a distintos grupos musculares provoca mayores desplazamientos del ángulo óptimo, posiciones más extendidas en los flexores y extensores del codo (12°) y en los flexores de rodillas (7°) comparados con los músculos extensores de rodilla (3°), argumentando que las diferencias existentes radican en las actividades diarias sometidas a cada grupo muscular, la arquitectura muscular y el porcentaje de cambio respecto de la longitud total entre grupos musculares.

El tiempo de recuperación del daño para las modificaciones del ángulo puede ser desde unas horas hasta varios días. Podemos comprobar cómo el ángulo óptimo

permanece modificado durante más días que el pico de momento articular tras provocar daño muscular (Bowers et al., 2004; Brockett et al., 2001), lo que ha sido atribuido al daño en el tejido conectivo (Crameri et al., 2007).

Recientemente, Small, McNaughton, Greig y Lovell (2010) mostraron la relación entre la fatiga y el cambio en el ángulo óptimo. Para contracciones concéntricas registraron un cambio hacia mayores longitudes musculares. Los mecanismos propuestos fueron la hipótesis del estallido del sarcómero (Proske & Morgan, 2001) y la contribución de los elementos elásticos para el desplazamiento del ángulo hacia mayores longitudes musculares (Whitehead, Weerakkody, Gregory, Morgan, & Proske, 2001). Por el contrario, en las contracciones excéntricas el ángulo se desplazó hacia longitudes musculares más cortas. Este cambio se puede argumentar por mecanismos estructurales, ya que en procesos de ejercicio agudo asociados con fatiga se ha registrado un descenso de la longitud del fascículo (Csapo, Alegre, & Baron, 2011). Sin embargo, en situaciones de fatiga, se produce una mayor elongación de los elementos elásticos (Kubo, Kanehisa, Kawakami, & Fukunaga, 2001). Por otro lado, la fatiga induce una menor capacidad de generar tensión en longitudes óptimas comparadas con longitudes musculares menores (Fitch & McComas, 1985). En definitiva, se obtiene el ángulo óptimo en longitudes musculares más cortas, porque se sitúa en la zona ascendente de la curva longitud-tensión y la interacción de los puentes es mejor que en posiciones más extendidas.

Daño muscular y efecto de intentos repetidos

En las situaciones donde se lleva a cabo una segunda sesión de ejercicio de características similares a la primera, el daño muscular se reduce (*fig. 3*). Este fenómeno es llamado efecto de intentos repetidos (*repeated bout effect*, RBE). Para el ángulo óptimo, representaría un menor desplazamiento de dicho ángulo hacia mayores longitudes musculares (McHugh & Tetro, 2003). Así pues, en los trabajos de Bowers et al. (2004) y Brockett et al. (2001) se registraron menores modificaciones del ángulo óptimo en un segundo intento.

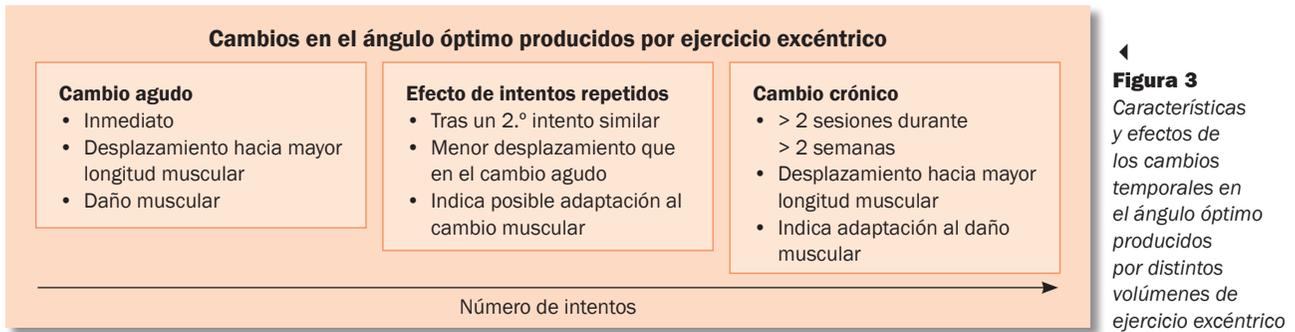
En relación con los factores antes mencionados que aumentan el daño muscular, estos favorecen el efecto de protección. De esta manera, la intensidad del primer intento, aumenta el RBE, lo que implica un menor daño muscular en el segundo intento (Crameri et al., 2007). De forma similar, el volumen de ejercicio prepara para

volúmenes superiores. El empleo de longitudes musculares largas favorece el efecto de protección del RBE, con un menor desplazamiento del ángulo óptimo. Con respecto a la velocidad, el empleo de velocidades más lentas en un primer intento proporciona un efecto de protección frente a velocidades más rápidas (Chapman, Newton, McGuigan, & Nosaka, 2011).

Los mecanismos propuestos para explicar el RBE son de tipo nervioso, mecánico y estructural (McHugh, Connolly, Eston, & Gleim, 1999; McHugh & Tetro, 2003). Con referencia a los primeros, el ángulo óptimo sigue desplazado aún cuando el momento articular ya está totalmente recuperado (Brockett et al., 2001) y observando los trabajos de T. C. Chen, Chen, Lin, Wu y Nosaka (2009) se aprecia cómo el momento de fuerza y el trabajo cambian de forma similar entre intentos. El ejercicio excéntrico máximo genera cambios nerviosos que deberían manifestar un cambio en la producción del momento de fuerza, pero no esto no se aprecia entre intentos. Además, Black y McCully (2008) encontraron una respuesta similar de protección entre sujetos estimulados eléctricamente y de activación voluntaria. Por todo esto, parece que los factores nerviosos no están detrás de la respuesta de protección.

Los factores mecánicos implican que el incremento de la tensión pasiva tras ejercicio excéntrico (McHugh, 2003) provoca un desplazamiento de la tensión total activa de la fibra muscular hacia mayores longitudes musculares. Este incremento se debe al reforzamiento de los elementos citoesqueléticos que sufren daño y alteran las propiedades mecánicas de la fibra muscular pudiendo modificar el ángulo óptimo. Este tipo de resultado podría observarse en los trabajos de McHugh y Tetro (2003) y T. C. Chen et al. (2009) donde se aprecia una menor caída del momento de fuerza tras intentos sucesivos en los rangos articulares correspondientes a longitudes musculares más largas sin modificación del ángulo óptimo de forma significativa.

Por último, los mecanismos estructurales se apoyan en la hipótesis de creación de nuevos sarcómeros dispuestos en serie (McHugh & Tetro, 2003). La sarcómerogénesis propiciaría que los sarcómeros tuvieran que alargarse menos para la misma cantidad de tensión por lo que no sufrirían un estrés excesivo y de esa forma se mitigaría el daño muscular. Cabe destacar que varios de los trabajos consultados abogan por este tipo de mecanismo como responsable de sus resultados (Bowers et al., 2004; Brockett et al., 2001; McHugh & Tetro, 2003). Por otro lado, T. C. Chen et



al. (2010) afirman que este tipo de mecanismo podría no ser el responsable debido a que no se dieron diferencias entre el valor del ángulo óptimo para el grupo de intentos máximos en ambos intentos y el primer intento máximo del grupo de intensidad submáxima. Otra razón esgrimida por este grupo se afina en el tiempo de duración de los cambios del ángulo óptimo apenas 5 días (T. C. Chen et al., 2009). Sin embargo, Seynnes, De Boer y Narici (2007) mostraron cómo la respuesta estructural del músculo puede ser muy rápida con entrenamiento (10 días para longitud de fascículos), por lo que un número mayor de intentos puede desencadenar este mecanismo. Las diferencias existentes pueden deberse a la diferente metodología de medición del ángulo óptimo y al empleo de distintas articulaciones. Por todo esto, los dos últimos factores, los mecánicos y los estructurales parecen ser los principales responsables del RBE.

Cambios del ángulo óptimo provocados por el entrenamiento

Las intervenciones planteadas a más largo plazo (al menos 2-3 sesiones semanales durante más de 2 semanas, -fig. 3-) para la modificación del ángulo óptimo se han centrado en operar sobre dos factores: la longitud muscular y el modo de contracción. En cuanto a la longitud, el empleo de ejercicios que implican contracciones isométricas, concéntricas y/o excéntricas en rangos articulares que se correspondan con longitudes musculares largas producen alteraciones del ángulo óptimo en la rodilla (Aquino et al., 2010; Ullrich, Kleinoder, & Bruggemann, 2009). Estos resultados son justificados por mecanismos de tipo estructural, aunque todavía no se han demostrado estos cambios mediante técnicas de imagen.

Analizando el modo de contracción, encontramos que el entrenamiento excéntrico altera el ángulo óptimo (Brughelli et al., 2010; Brughelli, Nosaka, & Cronin,

2009; Clark, Bryant, Culgan, & Hartley, 2005). Este hecho, podría relacionarse con el aumento del rango de movimiento activo y el descenso de la rigidez del tendón en modo pasivo (Mahieu et al., 2008) que propiciaría una mayor contribución de los elementos elásticos en el desarrollo de la curva momento articular ángulo. Por otro lado, los cambios en arquitectura muscular (Blazevich, Cannavan, Coleman, & Horne, 2007; Seynnes et al., 2007) también pueden generar un cambio en el ángulo óptimo.

La utilización de ejercicios excéntricos de intensidad elevada provoca mayores modificaciones del ángulo óptimo tras entrenamiento (Kilgallon, Donnelly, & Shafat, 2007). Es posible que el empleo de intensidades máximas provoque esta modificación del ángulo óptimo debido a mecanismos estructurales.

Partiendo de los estudios mencionados antes, podemos deducir que el cambio del ángulo óptimo se basará en la longitud y el modo de contracción combinados, para que produzcan mayores modificaciones del ángulo óptimo. Si a esto unimos el volumen y la intensidad, podemos afirmar que entrenar a longitudes musculares largas, junto con contracciones excéntricas, a intensidades elevadas y con volúmenes adecuados provocarán las mayores modificaciones del ángulo óptimo.

Procedimientos para modificar el ángulo óptimo. Aplicaciones en la prevención de lesiones

El ángulo óptimo ubicado en longitudes musculares cortas ha sido relacionado con mayor riesgo de lesión o recaída, sobre todo en flexores de rodilla (Brockett, Morgan, & Proske, 2004; Brughelli et al., 2009). Además, estos grupos musculares sufrieron más daño muscular inducido (Brockett et al., 2004). Esto se atribuye al hecho de que un ángulo óptimo desplazado hacia una longitud muscular más corta implica más sarcómeros

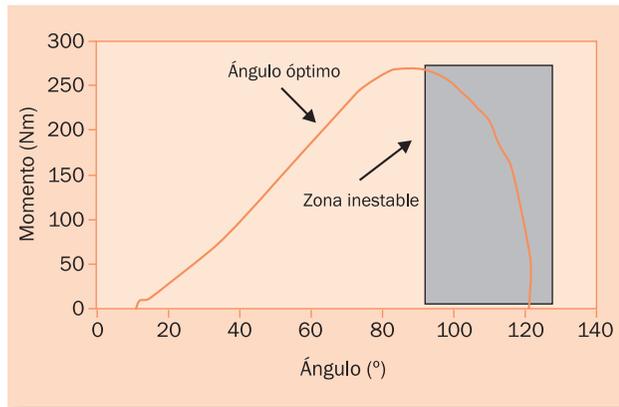


Figura 4

Curva momento de fuerza-ángulo articular. El rectángulo gris señala la zona inestable de la curva momento de fuerza-ángulo articular

que se encuentran en la zona descendente de su curva longitud tensión, donde son más inestables y su capacidad de generar puentes de actina y miosina es menor (fig. 4). A partir de este dato, surge la hipótesis de que el desplazamiento del ángulo óptimo hacia longitudes musculares largas podría reducir el riesgo de lesión debido a la reducción del rango articular donde se encuentra la inestabilidad.

Existen trabajos donde el empleo de ejercicio excéntrico redujo de forma significativa el número de lesiones (Arnason, Andersen, Holme, Engebretsen, & Bahr, 2008; Askling, Karlsson, & Thorstensson, 2003; Brooks, Fuller, Kemp, & Reddin, 2006; Gabbe, Bennell, Finch, Wajswelner, & Orchard, 2006). Recientemente, Brughelli et al. (2009) utilizaron un programa de ejercicio excéntrico y obtuvieron un cambio del ángulo óptimo en un deportista con lesiones recurrentes de flexores de rodilla. En esa misma línea, Brughelli, Mendiguchia et al. (2010) registraron cambios del ángulo óptimo en flexores y extensores de rodilla en futbolistas. Parece evidente que la utilización ejercicio excéntrico submáximo puede contribuir a la reducción del riesgo de lesión muscular debido a sus efectos sobre la curva longitud-tensión del músculo.

En cuanto a la longitud, parece claro que el empleo de longitudes musculares largas produce una modificación del ángulo óptimo, utilizando distinto tipos de ejercicios y cambiando las propiedades mecánicas del músculo (Aquino et al., 2010; Ullrich et al., 2009).

Los estudios mencionados anteriormente proponen ejercicios de tipo submáximo y con volumen semanal de 2-3 sesiones (Brughelli, Mendiguchia et al., 2010; Brughelli et al., 2009; Ullrich et al., 2009), llegando hasta 9 semanas de entrenamiento (Brughelli et al., 2009).

Modificación del ángulo óptimo en jugadores de fútbol

El 12 % de las lesiones de los futbolistas son de flexores de rodilla, porcentaje superior al de los extensores (Woods et al., 2004). En pretemporada se producen la mayor concentración de lesiones para estos grupos musculares (Woods et al., 2004). Para elaborar un programa de prevención de lesiones en función del cambio del ángulo óptimo debemos conocer este parámetro en los flexores y extensores de rodilla. En deportistas sin lesiones previas, la diferencia del ángulo óptimo calculado para flexores y extensores de rodilla no supera los 4° (Brockett et al., 2004), mientras que en jugadores con lesiones previas de flexores de rodilla, se han medido desplazamientos del ángulo óptimo de la pierna lesionada hacia longitudes musculares más cortas de hasta 12°-13°, comparando con la no lesionada (Brockett et al., 2004; Brughelli et al., 2009; Proske, Morgan, Brockett, & Percival, 2004). A partir de estos datos y la historia de lesiones de los jugadores se debe confeccionar el programa. Este programa ha sido aplicado en pretemporada 2-3 veces a la semana (Brughelli, Mendiguchia et al., 2010), como parte de la sesión o como entrenamiento complementario. En sujetos no habituados o poco entrenados suele aplicarse mediante contracción excéntrica sin sobrecarga, utilizando ejercicios del tipo “Nordic hamstrings” y zancadas para flexores de rodilla (Brughelli et al., 2009), y amortiguaciones desde una altura elevada (0.4-0.6 m) para extensores de rodilla (Brughelli, Mendiguchia et al., 2010). El volumen de series habitualmente utilizado puede ser de 2 a 5 con 6-12 repeticiones por serie (Brughelli, Mendiguchia et al., 2010; Brughelli et al., 2009).

En el caso de jugadores de alto nivel y habituados a este tipo de ejercicios, pueden utilizarse incrementos de intensidad, ya sea por la utilización de implementos, tipo balón medicinal, discos de halterofilia y/o barras cargadas para la realización de ejercicios tipo zancadas, “buenos días” y/o “peso muerto” para flexores de rodilla, mientras que para extensores se podrían combinar el tirante musculador con discos de halterofilia y balones medicinales, pudiéndose llevar a cabo 2-3 aplicaciones semanales dentro de la sesión, con un volumen de 2-4 series con 8-10 repeticiones por serie (Brughelli et al., 2009; Kilgallon et al., 2007).

En temporada regular es necesaria la incorporación de estos programas al entrenamiento (Steffen et al., 2010). Resulta obvio que en situaciones de alta densidad competitiva el volumen deba reducirse, aunque no la longitud muscular de aplicación del ejercicio y el tipo de contracción. Se

pueden realizar 1 ó 2 aplicaciones de 2 a 3 series con 6 a 10 repeticiones cada una. En situaciones de baja densidad de competición (1 partido/semana), pueden establecerse de 2 a 3 aplicaciones, donde se lleve a cabo 4 o 5 series de 1 o 2 ejercicios (Brughelli, Mendiguchia et al., 2010).

La sobrecarga excéntrica, ya sea, mediante el empleo de máquinas basadas en la inercia angular (polea cónica o “Yo-Yo”) ha mostrado su eficacia en programas de prevención de lesiones (Askling et al., 2003) muy aplicable a jugadores de alto nivel y habituados a este tipo de ejercicios, aunque no tenemos datos hasta donde conocemos sobre la modificación del ángulo óptimo. El reto de los programas de prevención es integrarlos dentro de los programas habituales de entrenamiento.

Conclusiones

Los cambios en el ángulo óptimo de una articulación pueden ser respuestas agudas o crónicas al ejercicio, especialmente al basado en contracciones excéntricas. Estos cambios se deben principalmente a modificaciones en los elementos contráctiles y elásticos.

La combinación de ejercicios realizados a longitudes musculares largas, contracciones excéntricas a intensidad elevada y altos volúmenes producen mayores desplazamientos del ángulo.

El ángulo óptimo puede ser utilizado para la identificación y prevención de lesiones de los flexores y extensores de rodilla. Este parámetro está desplazado hacia longitudes musculares más cortas en la musculatura con lesiones previas.

No se han estudiado hasta el momento respuestas al entrenamiento a largo plazo que analicen los efectos de los cambios en el ángulo óptimo sobre la incidencia de lesiones en deportes de equipo, y en concreto, en fútbol. También son necesarios más estudios que se centren en los cambios en la estructura del músculo asociados a los desplazamientos en el ángulo óptimo, para así conocer mejor los mecanismos que influyen en esta variable.

Agradecimientos

El trabajo ha sido parcialmente financiado por la Viceconsejería de Ciencia y Tecnología de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha con el Proyecto de Investigación “Criterios Biomecánicos para el diseño de máquinas de musculación y test de fuerza específicos” (referencia PIII109-0192-6593).

Los autores agradecen a la Escuela Universitaria de Enfermería y Fisioterapia de la Universidad de Castilla-

La Mancha el uso de material e instalaciones utilizados para presentar los datos de la *figura 4*.

Referencias

- Aquino, C. F., Fonseca, S. T., Goncalves, G. G., Silva, P. L., Ocarino, J. M., & Mancini, M. C. (2010). Stretching versus strength training in lengthened position in subjects with tight hamstring muscles: a randomized controlled trial. *Manual Therapy, 15*(1), 26-31. doi:10.1016/j.math.2009.05.006
- Arnason, A., Andersen, T. E., Holme, I., Engebretsen, L., & Bahr, R. (2008). Prevention of hamstring strains in elite soccer: An intervention study. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports, 18*(1), 40-48. doi:10.1111/j.1600-0838.2006.00634.x
- Askling, C., Karlsson, J., & Thorstensson, A. (2003). Hamstring injury occurrence in elite soccer players after preseason strength training with eccentric overload. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports, 13*(4), 244-250. doi:10.1034/j.1600-0838.2003.00312.x
- Black, C. D., & McCully, K. K. (2008). Muscle injury after repeated bouts of voluntary and electrically stimulated exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 40*(9), 1605-1615. doi:10.1249/MSS.0b013e3181788db
- Blazevich, A. J., Cannavan, D., Coleman, D. R., & Horne, S. (2007). Influence of concentric and eccentric resistance training on architectural adaptation in human quadriceps muscles. *Journal of Applied Physiology, 103*(5), 1565-1575. doi:10.1152/jappphysiol.00578.2007
- Bowers, E. J., Morgan, D. L., & Proske, U. (2004). Damage to the human quadriceps muscle from eccentric exercise and the training effect. *Journal of Sports Sciences, 22*(11-12), 1005-1014. doi:10.1080/02640410310001655796
- Brockett, C. L., Morgan, D. L., & Proske, U. (2001). Human hamstring muscles adapt to eccentric exercise by changing optimum length. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 33*(5), 783-790. doi:10.1097/00005768-200105000-00017
- Brockett, C. L., Morgan, D. L., & Proske, U. (2004). Predicting hamstring strain injury in elite athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 36*(3), 379-387. doi:10.1249/01.MSS.0000117165.75832.05
- Brooks, J. H., Fuller, C. W., Kemp, S. P., & Reddin, D. B. (2006). Incidence, risk, and prevention of hamstring muscle injuries in professional rugby union. *American Journal of Sports Medicine, 34*(8), 1297-1306. doi:10.1177/0363546505286022
- Brughelli, M., & Cronin, J. (2007). Altering the length-tension relationship with eccentric exercise: Implications for performance and injury. *Sports Medicine, 37*(9), 807-826. doi:10.2165/00007256-200737090-00004
- Brughelli, M., Cronin, J., & Nosaka, K. (2010). Muscle architecture and optimum angle of the knee flexors and extensors: A comparison between cyclists and Australian rules football players. *Journal of Strength and Conditioning Research, 24*(3), 717-721. doi:10.1519/JSC.0b013e318197009a
- Brughelli, M., Mendiguchia, J., Nosaka, K., Idoate, F., Arcos, A. L., & Cronin, J. (2010). Effects of eccentric exercise on optimum length of the knee flexors and extensors during the preseason in professional soccer players. *Physical Therapy in Sport, 11*(2), 50-55. doi:10.1016/j.ptsp.2009.12.002
- Brughelli, M., Nosaka, K., & Cronin, J. (2009). Application of eccentric exercise on an Australian rules football player with recurrent hamstring injuries. *Physical Therapy in Sport, 10*(2), 75-80. doi:10.1016/j.ptsp.2008.12.001
- Clark, R., Bryant, A., Culgan, J. P., & Hartley, B. (2005). The effects of eccentric hamstring strength training on dynamic jumping performance and isokinetic strength parameters: A pilot study on the implications for the prevention of hamstring injuries. *Physical Therapy in Sport, 6*(2), 67-73. doi:10.1016/j.ptsp.2005.02.003

- Cramer, R. M., Aagaard, P., Qvortrup, K., Langberg, H., Olesen, J., & Kjaer, M. (2007). Myofibre damage in human skeletal muscle: Effects of electrical stimulation versus voluntary contraction. *Journal of Physiology* (583)(Pt 1), 365-380.
- Csapo, R., Alegre, L. M., & Baron, R. (2011). Time kinetics of acute changes in muscle architecture in response to resistance exercise. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 14(3), 270-274. doi:10.1016/j.jsams.2011.02.003
- Chapman, D., Newton, M., McGuigan, M., & Nosaka, K. (2008). Effect of lengthening contraction velocity on muscle damage of the elbow flexors. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(5), 926-933. doi:10.1249/MSS.0b013e318168c82d
- Chapman, D., Newton, M., Sacco, P., & Nosaka, K. (2006). Greater muscle damage induced by fast versus slow velocity eccentric exercise. *International Journal of Sports Medicine*, 27(8), 591-598. doi:10.1055/s-2005-865920
- Chapman, D. W., Newton, M. J., McGuigan, M. R., & Nosaka, K. (2011). Effect of slow-velocity lengthening contractions on muscle damage induced by fast-velocity lengthening contractions. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(1), 211-219. doi:10.1519/JSC.0b013e3181bac2bd
- Chen, C. H., Nosaka, K., Chen, H. L., Lin, M. J., Tseng, K. W., & Chen, T. C. (2011). Effects of flexibility training on eccentric exercise-induced muscle damage. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 43(3), 491-500. doi:10.1249/MSS.0b013e3181f315ad
- Chen, T. C., Chen, H. L., Lin, M. J., Wu, C. J., & Nosaka, K. (2009). Muscle damage responses of the elbow flexors to four maximal eccentric exercise bouts performed every 4 weeks. *European Journal of Applied Physiology*, 106(2), 267-275. doi:10.1007/s00421-009-1016-7
- Chen, T. C., Chen, H. L., Lin, M. J., Wu, C. J., & Nosaka, K. (2010). Potent protective effect conferred by four bouts of low-intensity eccentric exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(5), 1004-1012. doi:10.1249/MSS.0b013e3181c0a818
- Fitch, S., & McComas, A. (1985). Influence of human muscle length on fatigue. *Journal of Physiology* (362), 205-213.
- Gabbe, B. J., Bennell, K. L., Finch, C. F., Wajswelner, H., & Orchard, J. W. (2006). Predictors of hamstring injury at the elite level of Australian football. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 16(1), 7-13. doi:10.1111/j.1600-0838.2005.00441.x
- Gregory, J. E., Morgan, D. L., Allen, T. J., & Proske, U. (2007). The shift in muscle's length-tension relation after exercise attributed to increased series compliance. *European Journal of Applied Physiology*, 99(4), 431-441. doi:10.1007/s00421-006-0363-x
- Herzog, W., Guimaraes, A. C., Anton, M. G., & Carter-Erdman, K. A. (1991). Moment-length relations of rectus femoris muscles of speed skaters/cyclists and runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 23(11), 1289-1296. doi:10.1249/00005768-199111000-00015
- Kawakami, Y., Kubo, K., Kanehisa, H., & Fukunaga, T. (2002). Effect of series elasticity on isokinetic torque-angle relationship in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 87(4-5), 381-387. doi:10.1007/s00421-002-0657-6
- Kilgallon, M., Donnelly, A. E., & Shafat, A. (2007). Progressive resistance training temporarily alters hamstring torque-angle relationship. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 17(1), 18-24.
- Kubo, K., Kanehisa, H., Kawakami, Y., & Fukunaga, T. (2001). Effects of repeated muscle contractions on the tendon structures in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 84(1-2), 162-166. doi:10.1007/s004210000337
- Lieber, R. L., & Friden, J. (2000). Functional and clinical significance of skeletal muscle architecture. *Muscle Nerve*, 23(11), 1647-1666. doi:10.1002/1097-4598(200011)23:11 <1647::AID-MUS1 >3.3.CO;2-D
- Mahieu, N. N., McNair, P., Cools, A., D'Haen, C., Vandermeulen, K., & Witvrouw, E. (2008). Effect of eccentric training on the plantar flexor muscle-tendon tissue properties. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(1), 117-123.
- McHugh, M. P. (2003). Recent advances in the understanding of the repeated bout effect: The protective effect against muscle damage from a single bout of eccentric exercise. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 13(2), 88-97. doi:10.1034/j.1600-0838.2003.02477.x
- McHugh, M. P., Connolly, D. A., Eston, R. G., & Gleim, G. W. (1999). Exercise-induced muscle damage and potential mechanisms for the repeated bout effect. *Sports Medicine*, 27(3), 157-170. doi:10.2165/00007256-199927030-00002
- McHugh, M. P., & Tetro, D. T. (2003). Changes in the relationship between joint angle and torque production associated with the repeated bout effect. *Journal of Sports Sciences*, 21(11), 927-932. doi:10.1080/0264041031000140400
- Morgan, D. L., & Allen, D. G. (1999). Early events in stretch-induced muscle damage. *Journal of Applied Physiology*, 87(6), 2007-2015.
- Philippou, A., Bogdanis, G. C., Nevill, A. M., & Maridaki, M. (2004). Changes in the angle-force curve of human elbow flexors following eccentric and isometric exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 93(1-2), 237-244. doi:10.1007/s00421-004-1209-z
- Philippou, A., Maridaki, M., & Bogdanis, G. C. (2003). Angle-specific impairment of elbow flexors strength after isometric exercise at long muscle length. *Journal of Sports Sciences*, 21(10), 859-865. doi:10.1080/0264041031000140356
- Prasartwuth, O., Allen, T. J., Butler, J. E., Gandevia, S. C., & Taylor, J. L. (2006). Length-dependent changes in voluntary activation, maximum voluntary torque and twitch responses after eccentric damage in humans. *Journal of Physiology* (571)(Pt 1), 243-252.
- Proske, U., & Morgan, D. L. (2001). Muscle damage from eccentric exercise: Mechanism, mechanical signs, adaptation and clinical applications. *Journal of Physiology* (537)(Pt 2), 333-345. doi:10.1111/j.1440-1681.2004.04028.x
- Proske, U., Morgan, D. L., Brockett, C. L., & Percival, P. (2004). Identifying athletes at risk of hamstring strains and how to protect them. *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology*, 31(8), 546-550.
- Savelberg, H. H., & Meijer, K. (2003). Contribution of mono- and bi-articular muscles to extending knee joint moments in runners and cyclists. *Journal of Applied Physiology*, 94(6), 2241-2248.
- Seynnes, O. R., de Boer, M., & Narici, M. V. (2007). Early skeletal muscle hypertrophy and architectural changes in response to high-intensity resistance training. *Journal of Applied Physiology*, 102(1), 368-373. doi:10.1152/jappphysiol.00789.2006
- Small, K., McNaughton, L., Greig, M., & Lovell, R. (2010). The effects of multidirectional soccer-specific fatigue on markers of hamstring injury risk. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(1), 120-125. doi:10.1016/j.jsams.2008.08.005
- Steffen, K., Andersen, T. E., Krosshaug, T., Van Mechelen, W., Myklebust, G., Verhagen, E. A., & Roald, B. (2010). ECSS Position Statement 2009: Prevention of acute sports injuries. *European Journal of Sport Science*, 10(4), 223-226. doi:10.1080/17461390903585173
- Ullrich, B., & Bruggemann, G. P. (2008). Moment-knee angle relation in well trained athletes. *International Journal of Sports Medicine*, 29(8), 639-645. doi:10.1055/s-2007-989322
- Ullrich, B., Kleinoder, H., & Bruggemann, G. P. (2009). Moment-angle relations after specific exercise. *International Journal of Sports Medicine*, 30(4), 293-301. doi:10.1055/s-0028-1104589
- Whitehead, N. P., Weerakkody, N. S., Gregory, J. E., Morgan, D. L., & Proske, U. (2001). Changes in passive tension of muscle in humans and animals after eccentric exercise. *Journal of Physiology* (533) (Pt 2), 593-604.
- Woods, C., Hawkins, R. D., Maltby, S., Hulse, M., Thomas, A., & Hodson, A. (2004). The Football Association Medical Research Programme: An audit of injuries in professional football--analysis of hamstring injuries. *British Journal of Sports Medicine*, 38(1), 36-41. doi:10.1136/bjism.2002.002352
- Yeung, S., & Yeung, E. W. (2008). Shift of peak torque angle after eccentric exercise. *International Journal of Sports Medicine*, 29(3), 251-256. doi:10.1055/s-2007-965337