

Angle òptim articular i exercici: bases i aplicacions

Optimum Joint Angle and Exercise: Foundations and Applications

PABLO ANTONIO RUBIO-SOBRINO

RAÚL RODRÍGUEZ-CASARES

XAVIER AGUADO

LUIS M. ALEGRE

Grup de Biomecànica Humana i Esportiva

Universidad de Castilla-La Mancha (Toledo, Espanya)

Autor per a la correspondència

Luis M. Alegre

luis.alegre@uclm.es

Resum

L'angle òptim es refereix a la posició articular en la qual es produeix el pic màxim de moment de força dins la corba angle - moment articular. Aquest paràmetre pot utilitzar-se per estimar les modificacions en la corba força-longitud d'un grup muscular. L'angle òptim pot ser obtingut a partir de mesures en tests isomètrics o dinàmics, i això ha de ser tingut en compte a l'hora d'establir comparacions. L'angle òptim pot ser modificat tant de manera aguda com crònica. Els principals factors que el modifiquen són la intensitat i el volum de l'exercici, la longitud muscular, el mode de contracció i la velocitat de contracció. La capacitat per avaluar i modificar l'angle òptim pot utilitzar-se en programes de prevenció de lesions musculars, especialment en esports d'equip com el futbol. Aquesta revisió analitza i discuteix els estudis que es troben en la bibliografia relacionats amb aquest tema.

Paraules clau: relació força-longitud muscular, sarcomerogènesi, longitud de fascicles, lesió muscular, isocinètic, biomecànica

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

Definició i concepte

L'angle òptim és definit com la posició articular en què s'aconsegueix el pic màxim de moment de força (Brockett, Morgan, & Proske, 2001). Dins la bibliografia científica internacional s'al·ludeix a aquest concepte com a *optimum angle* i *angle of peak torque*. L'angle òptim es refereix a la posició articular, i s'utilitza per aconseguir una referència externa del grau d'estirada del complex musculotendó. No obstant això, aquest no ha de confondre's amb la longitud muscular òptima, que expressa la distància on es produeix la màxima tensió d'una fibra i/o un sarcòmer

mesurat a velocitat igual a zero. L'angle òptim sorgeix de la contribució del complex musculotendó i la longitud òptima, i en el cas del sarcòmer, expressa la tensió generada per la interacció dels ponts creuats, en concret la distància on es produeix la millor superposició d'actina i miosina. En la fibra ha d'afegir-se la contribució dels elements elàstics que desplacen la tensió total (tensió activa més tensió passiva) cap a longituds musculars més llargues (*fig. 1*).

En l'àmbit del múscul complet, l'arquitectura muscular afecta la longitud òptima. En dos músculs amb les mateixes àrees de secció transversal i angles

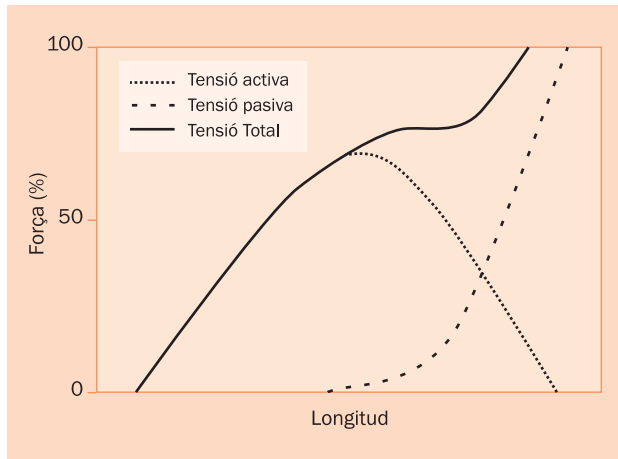


Figura 1

Relació longitud-tensió d'una fibra. La tensió total seria la suma de la tensió passiva i la tensió activa

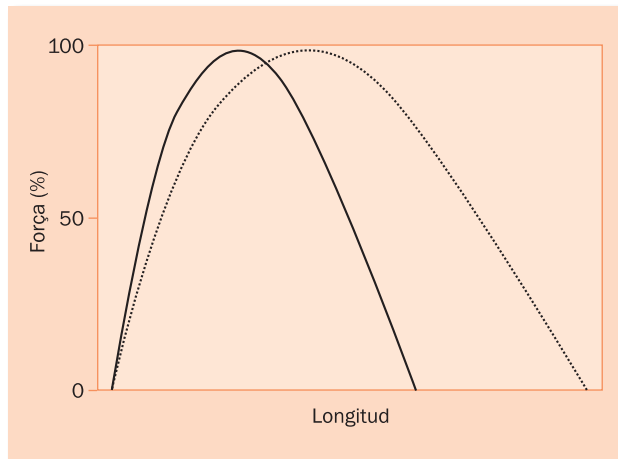


Figura 2

Relació longitud-tensió de fibres amb diverses longituds de fascicle. La línia contínua pertany a un múscul amb fibres curtes. La línia puntejada es correspon a un múscul amb fascicles més llargs

de pennació, el que té una major longitud de fascicles tindrà major rang de moviment actiu i aconseguirà la seva longitud òptima a longituds musculars majors (Lieber & Friden, 2000) (fig. 2). Els elements elàstics en sèrie configuren una corba longitud-tensió més ampla. Això és degut al fet que permeten l'escurçada a costa de la seva deformació i per tant augmenten el rang funcional i desplacen la longitud òptima cap a longituds musculars més grans (Lieber & Friden, 2000). En situacions dinàmiques de mesurament, l'angle es desplaça cap a longituds musculars més curtes segons

augmenta la velocitat d'extensió de genoll (Kawakami, Kubo, Kanehisa, & Fukunaga, 2002) per la deformació dels elements elàstics.

La pràctica esportiva a llarg termini pot generar modificacions de l'estructura del múscul i en la rigidesa del tendó que poden incidir a la manifestació de l'angle òptim. Han estat descrites longituds òptimes distintes per al recte femoral segons l'especialitat esportiva (Herzog, Guimaraes, Anton, & Carter-Erdman, 1991). Per exemple, Savelberg i Meijer (2003) van publicar que els corredors habituals van produir el màxim moment d'extensors de genoll amb una diferència de 4 t cap a majors longituds musculars respecte als ciclistes. Més recentment, Ullrich i Brüeggemann (2008) van trobar que no hi havia diferències en el quàdriceps entre esportistes de carrera de resistència, ciclistes i jugadors de tennis. No obstant això, Brughelli, Cronin i Nosaka (2010) van obtenir dels seus mesuraments angles òptims equivalents a majors longituds musculars de flexors i extensors de genoll en jugadors de futbol australià comparats amb ciclistes. Les diferències entre aquests estudis poden provenir que no van utilitzar la mateixa metodologia de mesurament. Tot i així, mostren que és possible determinar la longitud muscular de manera externa i semblen corroborar que l'especialitat esportiva condiciona l'angle òptim.

Metodologies de mesurament de l'angle òptim

Les articulacions més estudiades en la bibliografia són el colze, el genoll i el turmell. Bàsicament, s'han documentat dos mètodes per a la determinació d'aquest angle mitjançant la utilització de dinamòmetres. Amb el primer d'aquests, l'angle òptim s'obté mitjançant contraccions isomètriques en angles concrets i el segon es basa en accions dinàmiques en tot el rang de moviment. Per al càlcul de l'angle, s'han utilitzat principalment ajustos polinòmics a partir de diverses repeticions, ja que l'obtenció de l'angle a partir d'una sola contracció presenta una baixa reproduïbilitat. El valor de l'angle òptim serà distint depenent del mode de contracció elegit per calcular-lo. L'ocupació de contraccions isomètriques requereix utilitzar una gran quantitat de temps per a la valoració, a més de ser menys específica. D'altra banda, la utilització de contraccions dinàmiques és més ràpida i té un major component de transferència, encara que s'ha de tenir en compte que el mesurament estarà influït per les característiques no

sols del component contràctil, sinó dels elements elàstics en sèries i en paral·lel. L'ocupació de velocitats altes de contracció isocinètica implica que l'angle es desplaça cap a longituds musculars més curtes i posicions articulars més esteses a causa de la contribució del tendó (Kawakami et al., 2002).

Mecanismes i factors del canvi de l'angle òptim

L'angle òptim pot ser modificat, i en aquest punt s'expliquen els factors responsables dels canvis aguts i crònics produïts per l'exercici físic (*fig. 3*).

Dany muscular i canvi immediat

El dany muscular és una alteració en les estructures de la fibra i del sarcòmer, i implica un canvi en les propietats mecàniques del múscul complet. Aquí ens referirem al "canvi immediat" com el produït per una sola sessió d'exercici. Respecte a l'angle òptim, es produeix un desplaçament del pic de moment de força articular cap a majors longituds musculars (desplaçament cap a la dreta de la corba longitud-tensió). Això es vincula amb mecanismes perifèrics relacionats amb la pèrdua de la capacitat de produir tensió activa, dany en el sistema d'excitació-adaptament, a l'augment de la tensió passiva i/o a l'esclat del sarcòmer (Gregory, Morgan, Allen, & Proske, 2007; Morgan & Allen, 1999; Philippou, Bogdanis, Nevill, & Maridaki, 2004; Prasartwuth, Allen, Butler, Gandevia, & Taylor, 2006; Proske & Morgan, 2001). Per això, el canvi en l'angle òptim ha estat utilitzat com a indicador de dany muscular (Proske & Morgan, 2001).

Els factors que poden induir una major quantitat de canvi de l'angle òptim per dany muscular són la longitud muscular, el mode de contracció, la intensitat, el volum i la velocitat.

- Quant a la longitud muscular, en els estudis de dany muscular i angle òptim els exercicis que han utilitzat una longitud muscular llarga o branca descendent de la corba longitud-tensió han mostrat més magnitud de canvi en graus, tant en la musculatura del genoll (Bowers, Morgan, & Proske, 2004) com en la del colze (Philippou et al., 2004; Prasartwuth et al., 2006). A més a més, hi ha evidències que mostren que l'aplicació d'exercicis de caràcter isomè-

tric en longituds musculars llargues indueix un dany muscular que pot ocasionar un canvi en l'angle òptim, reduint el moment articular respecte a la línia base (Philippou et al., 2004). L'aplicació de contraccions isomètriques en longituds musculars llargues implica una reducció del moment de força major que en longituds musculars curtes (Philippou, Maridaki, & Bogdanis, 2003), a causa de la modificació de la longitud òptima que implica dany muscular (Gregory et al., 2007).

- Quant al mode de contracció, la contracció excèntrica, amb una major tensió i un nombre menys gran de fibres activades, produeix un major dany muscular que altres tipus de contracció (Brugherelli & Cronin, 2007). Recentment, Yeung i Yeung (2008) van obtenir diferències significatives en l'angle òptim dels extensors de genolls amb exercici excèntric i modificacions no significatives en mode concèntric, sense caigudes del moment de força de manera significativa.
- Pel que fa al volum i intensitat de l'exercici, els treballs sobre dany muscular mostren clarament desplaçaments de l'angle òptim cap a majors longituds musculars amb volums i intensitats alts (Bowers et al., 2004; Prasartwuth et al., 2006).
- Els marcadors indirectes de dany muscular mostren augments conforme creix la velocitat de contracció (Chapman, Newton, Sacco, & Nosaka, 2006). Amb alts volums de repeticions s'augmenta el dany a velocitats altes, per la qual cosa la fatiga podria emascarar l'efecte de la velocitat (Chapman, Newton, McGuigan, & Nosaka, 2008).

El canvi immediat en l'angle òptim, prenent aquest com a indicador del dany muscular, és distint entre grups musculars. C. H. Chen et al. (2011) han demostrat com una metodologia idèntica aplicada a distints grups musculars provoca majors desplaçaments de l'angle òptim, posicions més esteses en els flexors i extensors del colze (12è) i en els flexors de genolls (7) comparats amb els músculs extensors de genoll (3), argumentant que les diferències existents rau en les activitats diàries sotmeses a cada grup muscular, l'arquitectura muscular i el percentatge de canvi respecte de la longitud total entre grups musculars.

El temps de recuperació del dany per a les modificacions de l'angle pot ser des d'unes hores fins

a diversos dies. Podem comprovar com l'angle òptim es manté modificat durant més dies que el pic de moment articular després de provocar dany muscular (Bowers et al., 2004; Brockett et al., 2001), la qual cosa ha estat atribuïda al dany en el teixit connectiu (Crameri et al., 2007).

Recentment, Small, McNaughton, Greig i Lovell (2010) van mostrar la relació entre la fatiga i el canvi en l'angle òptim. Pel que fa a contraccions concèntriques, van registrar un canvi cap a majors longituds musculars. Els mecanismes proposats van ser la hipòtesi de l'esclat del sarcòmer (Proske & Morgan, 2001) i la contribució dels elements elàstics per al desplaçament de l'angle cap a majors longituds musculars (Whitehead, Weerakkody, Gregory, Morgan, & Proske, 2001). Al contrari, en les contraccions excèntriques l'angle es va desplaçar cap a longituds musculars més curtes. Aquest canvi es pot argumentar per mecanismes estructurals, ja que en processos d'exercici agut associats amb fatiga s'ha registrat un descens de la longitud del fascicle (Csapo, Alegre, & Baron, 2011). No obstant això, en situacions de fatiga, es produeix una major elongació dels elements elàstics (Kubo, Kanehisa, Kawakami, & Fukunaga, 2001). D'altra banda, la fatiga indueix una menor capacitat de generar tensió en longituds òptimes comparades amb longituds musculars menors (Fitch & McComas, 1985). En definitiva, s'obté l'angle òptim en longituds musculars més curtes perquè se situa a la zona ascendent de la corba longitud-tensió i la interacció dels ponts és millor que en posicions més esteses.

Dany muscular i efecte d'intents repetits

En les situacions en què es du a terme una segona sessió d'exercici de característiques similars a la primera, el dany muscular es redueix (*fig. 3*). Aquest fenomen s'anomena efecte d'intents repetits (*repeated bout effect, RBE*). Pel que fa a l'angle òptim, representaria un menor desplaçament d'aquest angle cap a majors longituds musculars (McHugh & Tetro, 2003). Així doncs, en els treballs de Bowers et al. (2004) i Brockett et al. (2001) es van registrar menors modificacions de l'angle òptim en un segon intent.

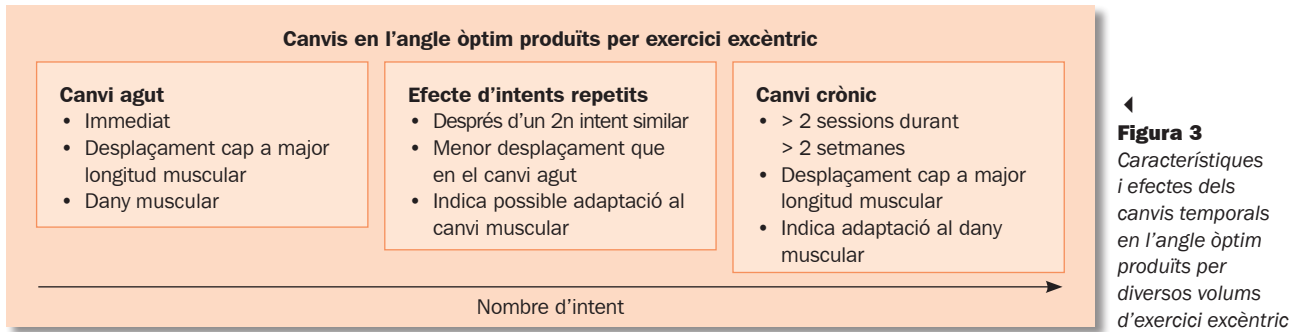
En relació amb els factors abans esmentats que augmenten el dany muscular, aquests afavoreixen l'efecte de protecció. D'aquesta manera, la intensitat del primer intent augmenta l'*RBE*, la qual cosa implica un menor

dany muscular en el segon intent (Crameri et al., 2007). De forma similar, el volum d'exercici prepara per a volums superiors. L'ocupació de longituds musculars llargues afavoreix l'efecte de protecció de l'*RBE*, amb un menor desplaçament de l'angle òptim. Respecte a la velocitat, l'ocupació de velocitats més lentes en un primer intent proporciona un efecte de protecció enfront de velocitats més ràpides (Chapman, Newton, McGuigan, & Nosaka, 2011).

Els mecanismes proposats per explicar l'*RBE* són de tipus nerviosos, mecànic i estructural (McHugh, Connolly, Eston, & Gleim, 1999; McHugh & Tetro, 2003). Amb referència als primers, l'angle òptim segueix desplaçat encara que el moment articular ja està totalment recuperat (Brockett et al., 2001), i observant els treballs de T. C. Chen, Chen, Lin, Wu i Nosaka (2009) s'aprecia com el moment de força i el treball canvien de forma similar entre intents. L'exercici excèntric màxim genera canvis nerviosos que haurien de manifestar un canvi en la producció del moment de força, però això no s'aprecia entre intents. A més a més, Black i McCully (2008) van trobar una resposta similar de protecció entre subjectes estimulats elèctricament i d'activació voluntària. Per tot això, sembla que els factors nerviosos no estan darrere la resposta de protecció.

Els factors mecànics impliquen que l'increment de la tensió passiva després d'exercici excèntric (McHugh, 2003) provoca un desplaçament de la tensió total activa de la fibra muscular cap a majors longituds musculars. Aquest increment es deu al reforçament dels elements citoesquelètics que pateixen dany i alteren les propietats mecàniques de la fibra muscular de manera que es pot modificar l'angle òptim. Aquest tipus de resultat podria observar-se en els treballs de McHugh i Tetro (2003) i T. C. Chen et al. (2009), on s'aprecia una menor caiguda del moment de força després d'intents successius en els rangs articulars corresponents a longituds musculars més llargues sense modificació de l'angle òptim de manera significativa.

A l'últim, els mecanismes estructurals recolzen en la hipòtesi de creació de nous sarcòmers disposats en sèrie (McHugh & Tetro, 2003). La sarcomerogènesi propiciaria que els sarcòmers haguessin d'allargar-se menys per a la mateixa quantitat de tensió, per això no patirien un estrès excessiu i d'aquesta forma es mitigaria el dany muscular. Cal destacar que alguns dels treballs consultats advoquen per aquest tipus de mecanisme com a responsable dels seus resultats (Bowers et al., 2004; Brockett et al., 2001; McHugh & Tetro,



2003). D'altra banda, T. C. Chen et al. (2010) afirmen que aquest tipus de mecanisme podria no ser el responsable pel fet que no es van donar diferències entre el valor de l'angle òptim per al grup d'intents màxims en ambdós intents i el primer intent màxim del grup d'intensitat submàxima. Una altra raó esgrimida per aquest grup s'estableix en el temps de durada dels canvis de l'angle òptim de tot just 5 dies (T. C. Chen et al., 2009). No obstant això, Seynnes, De Boer i Narici (2007) van mostrar com la resposta estructural del múscul pot ser molt ràpida amb entrenament (10 dies per a longitud de fascicles), per la qual cosa un nombre més gran d'intents pot desencadenar aquest mecanisme. Les diferències existents poden deure's a la diferent metodologia de mesurament de l'angle òptim i a l'ocupació de distintes articulacions. Per tot això, els dos últims factors, els mecànics i els estructurals, semblen ser els principals responsables de l'RBE.

Canvis de l'angle òptim provocats per l'entrenament

Les intervencions plantejades a més llarg termini (almenys 2-3 sessions setmanals durant més de 2 setmanes, *fig. 3*) per a la modificació de l'angle òptim s'han centrat a operar sobre dos factors: la longitud muscular i el mode de contracció. Quant a la longitud, l'ocupació d'exercicis que impliquen contraccions isomètriques, concèntriques i/o excèntriques en rangs articulars que es corresponguin amb longituds musculars llargues produeixen alteracions de l'angle òptim al genoll (Aquino et al., 2010; Ullrich, Kleinoder, & Bruggemann, 2009). Aquests resultats són justificats per mecanismes de tipus estructural, tot i que encara no s'han demostrat aquests canvis mitjançant tècniques d'imatge.

Analitzant el mode de contracció, trobem que l'entrenament excèntric altera l'angle òptim (Brughelli et

al., 2010; Brughelli, Nosaka, & Cronin, 2009; Clark, Bryant, Culgan, & Hartley, 2005). Aquest fet podria relacionar-se amb l'augment del rang de moviment actiu i el descens de la rigidesa del tendó en mode passiu (Mahieu et al., 2008), que propiciaria una major contribució dels elements elàstics en el desenvolupament de la corba angle - moment articular. D'altra banda, els canvis en arquitectura muscular (Blazevich, Cannavan, Coleman, & Horne, 2007; Seynnes et al., 2007) també poden generar un canvi en l'angle òptim.

La utilització d'exercicis excèntrics d'intensitat elevada provoca majors modificacions de l'angle òptim després d'entrenament (Kilgallon, Donnelly, & Shafat, 2007). És possible que l'ocupació d'intensitats màximes provoqui aquesta modificació de l'angle òptim a causa de mecanismes estructurals.

Partint dels estudis esmentats abans, podem deduir que el canvi de l'angle òptim es basarà en la longitud i el mode de contracció combinats, perquè produeixin majors modificacions de l'angle òptim. Si a això unim el volum i la intensitat, podem afirmar que entrenar a longituds musculars llargues, junt amb contraccions excèntriques, a intensitats elevades i amb volums adequats provocaran les majors modificacions de l'angle òptim.

Procediments per modificar l'angle òptim. Aplicacions en la prevenció de lesions

L'angle òptim ubicat en longituds musculars curtes ha estat relacionat amb un major risc de lesió o recaiguda, sobretot en flexors de genoll (Brockett, Morgan, & Proske, 2004; Brughelli et al., 2009). A més a més, aquests grups musculars van patir més dany muscular induït (Brockett et al., 2004). Això s'atribueix al fet que un angle òptim desplaçat cap a una longitud muscular més curta implica més sarcòmers que es troben a la zona

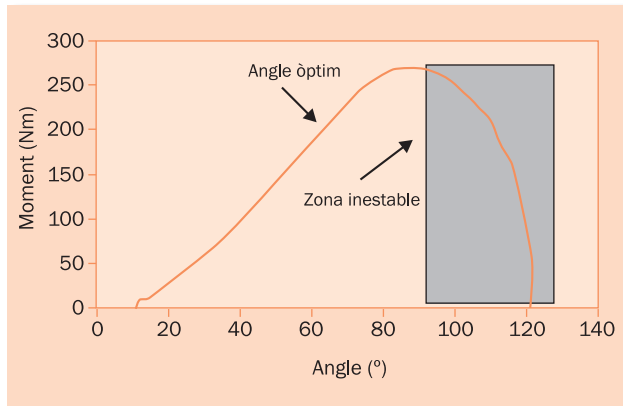


Figura 4

Corba moment de força - angle articular. El rectangle gris assenyalava la zona inestable de la corba moment de força - angle articular

descendent de la seva corba longitud-tensió, on són més inestables i la seva capacitat de generar ponts d'actina i miosina és menor (fig. 4). A partir d'aquesta dada, sorgeix la hipòtesi que el desplaçament de l'angle òptim cap a longituds musculars llargues podria reduir el risc de lesió a causa de la reducció del rang articular on es troba la inestabilitat.

Hi ha treballs on l'ocupació d'exercici excèntric va reduir de manera significativa el nombre de lesions (Arnason, Andersen, Holme, Engebretsen, & Bahr, 2008; Askling, Karlsson, & Thorstensson, 2003; Brooks, Fuller, Kemp, & Reddin, 2006; Gabbe, Bennell, Finch, Wajswelner, & Orchard, 2006). Recentment, Brughelli et al. (2009) van utilitzar un programa d'exercici excèntric i van obtenir un canvi de l'angle òptim en un esportista amb lesions recurrents de flexors de genoll. En aquesta mateixa línia, Brughelli, Mendiguchia et al. (2010) van registrar canvis de l'angle òptim en flexors i extensors de genoll en futbolistes. Sembla evident que la utilització d'exercici excèntric submàxim pot contribuir a la reducció del risc de lesió muscular a causa dels seus efectes sobre la corba longitud-tensió del múscul.

Quant a la longitud, sembla clar que l'ocupació de longituds musculars llargues produeix una modificació de l'angle òptim utilitzant diversos tipus d'exercicis i canviant les propietats mecàniques del múscul (Aquino et al., 2010; Ullrich et al., 2009).

Els estudis esmentats anteriorment proposen exercicis de tipus submàxim i amb un volum setmanal de 2-3 sessions (Brughelli, Mendiguchia et al., 2010; Brughelli et al., 2009; Ullrich et al., 2009), i arriben fins a 9 setmanes d'entrenament (Brughelli et al., 2009).

Modificació de l'angle òptim en jugadors de futbol

El 12 % de les lesions dels futbolistes són de flexors de genoll, percentatge superior al dels extensors (Woods et al., 2004). En pretemporada es produeixen la major concentració de lesions per a aquests grups musculars (Woods et al., 2004). Per elaborar un programa de prevenció de lesions segons el canvi de l'angle òptim, hem de conèixer aquest paràmetre en els flexors i extensors de genoll. En esportistes sense lesions prèvies, la diferència de l'angle òptim calculat per a flexors i extensors de genoll no supera els 4° (Brockett et al., 2004), mentre que en jugadors amb lesions prèvies de flexors de genoll s'han mesurat desplaçaments de l'angle òptim de la cama lesionada cap a longituds musculars més curtes de fins a 12°-13°, comparant amb la no lesionada (Brockett et al., 2004; Brughelli et al., 2009; Proske, Morgan, Brockett, & Percival, 2004). A partir d'aquestes dades i la història de lesions dels jugadors, s'ha de confeccionar el programa. Aquest programa ha estat aplicat en pretemporada dues o tres vegades a la setmana (Brughelli, Mendiguchia et al., 2010), com a part de la sessió o com a entrenament complementari. En subjectes no habituats o poc entrenats sol aplicar-se mitjançant una contracció excèntrica sense sobrecàrrega, utilitzant exercicis del tipus *Nordic hamstrings* i gambades per a flexors de genoll (Brughelli et al., 2009), i esmorteïments des d'una altura elevada (0,4-0,6 m) per a extensors de genoll (Brughelli, Mendiguchia et al., 2010). El volum de sèries habitualment utilitzat pot ser de 2 a 5, amb 6-12 repeticions per sèrie (Brughelli, Mendiguchia et al., 2010; Brughelli et al., 2009).

En el cas de jugadors d'alt nivell i habituats a aquest tipus d'exercicis, poden utilitzar-se increments d'intensitat, sigui amb la utilització d'implementes tipus baló medicinal, discos d'halterofília i/o barres carregades per a la realització d'exercicis del tipus gambades, "bon dia" i/o "pes mort" per a flexors de genoll, mentre que per a extensors es podrien combinar el tirant muscular amb discos d'halterofília i balons medicinals, i es poden dur a terme 2-3 aplicacions setmanals dins la sessió, amb un volum de 2-4 sèries amb 8-10 repeticions per sèrie (Brughelli et al., 2009; Kilgallon et al., 2007).

En temporada regular és necessària la incorporació d'aquests programes a l'entrenament (Steffen et al., 2010). Resulta obvi que en situacions d'alta densitat competitiva el volum hagi de reduir-se, encara que no la longitud muscular d'aplicació de l'exercici i el tipus de contracció. Es poden fer 1 o 2 aplicacions de 2 a 3 sèries amb 6 a 10 repeticions cadascuna. En situacions de

baixa densitat de competició (1 partit/setmana), poden establir-se de 2 a 3 aplicacions, on es duguin a terme 4 o 5 sèries d'1 o 2 exercicis (Brughelli, Mendiguchia et al., 2010).

La sobrecàrrega excèntrica, sigui mitjançant l'ocupació de màquines basades en la inèrcia angular (politja cònica o "io-io"), ha mostrat la seva eficàcia en programes de prevenció de lesions (Askling et al., 2003) molt aplicable a jugadors d'alt nivell i habituats a aquest tipus d'exercicis, encara que no tenim dades, pel que coneixem, sobre la modificació de l'angle òptim. El repte dels programes de prevenció és integrar-los dins els programes habituals d'entrenament.

Conclusions

Els canvis a l'angle òptim d'una articulació poden ser respostes agudes o cròniques a l'exercici, especialment al basat en contraccions excèntriques. Aquests canvis es deuen principalment a modificacions en els elements contràctils i elàstics.

La combinació d'exercicis fets a longituds musculars llargues, contraccions excèntriques a intensitat elevada i alts volums produeixen majors desplaçaments de l'angle.

L'angle òptim pot ser utilitzat per a la identificació i prevenció de lesions dels flexors i extensors de genoll. Aquest paràmetre està desplaçat cap a longituds musculars més curtes en la musculatura amb lesions prèvies.

No s'han estudiat fins avui respostes a l'entrenament a llarg termini que analitzin els efectes dels canvis en l'angle òptim sobre la incidència de lesions en esports d'equip, i en concret en futbol. També són necessaris més estudis que se centrin en els canvis en l'estructura del múscul associats als desplaçaments en l'angle òptim, per a així conèixer millor els mecanismes que influeixen en aquesta variable.

Agraïments

El treball ha estat parcialment finançat per la Viceconselleria de Ciència i Tecnologia de la Junta de Comunitats de Castilla-La Mancha amb el projecte d'investigació "Criterios Biomecánicos para el diseño de máquinas de musculación y tests de fuerza específicos" (referència PIII109-0192-6593).

Els autors agraeixen a l'Escola Universitària d'Infermeria i Fisioteràpia de la Universitat de Castilla-La Mancha l'ús de material i instal·lacions utilitzats per presentar les dades de la *figura 4*.

Referències

- 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.0b013e3181788dbe
- 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 biarticular 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