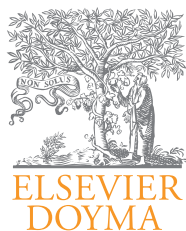


Apunts Med Esport. 2013;48(178):69-76



apunts

MÉDICINA DE L'ESPORT

www.apunts.org



REVISIÓ

Rol del sistema sensoriomotor en l'estabilitat articular durant les activitats esportives

Azahara Fort Vanmeerhaeghe^{a,b,*} i Daniel Romero Rodriguez^a

^a Escola Universitària de la Salut i l'Esport (EUSES), Universitat de Girona, Girona, Espanya

^b Facultat de Psicologia, Ciències de l'Educació i de l'Esport, Universitat Ramon Llull, Barcelona, Espanya

Rebut el 22 de juny de 2012; acceptat el 25 de setembre de 2012.

PARAULES CLAU

Sensoriomotor;
Propiocepció;
Control neuromuscular

KEYWORDS

Sensorimotor;
Proprioception;
Neuromuscular control

Resum Actualment, en l'àmbit de les ciències de l'activitat física i l'esport hi ha una certa controvèrsia en l'expressió «sistema sensoriomotor», que ha estat sovint mal anomenat i simplificat amb la paraula «propiocepció». Aquest sistema complex incorpora tots els components aferents, el procés d'integració i processament central i les respostes eferents, amb l'objectiu de mantenir l'estabilitat funcional de l'articulació durant els moviments del cos. Aquesta revisió té com a principal objectiu aclarir els conceptes relacionats amb el sistema sensoriomotor i comprendre'n la importància en l'entrenament, la prevenció i la readaptació a la competició esportiva.

© 2012 Consell Català de l'Esport. Generalitat de Catalunya. Publicat per Elsevier España, S.L. Tots els drets reservats.

The role of the sensory-motor system in joint stability during sports activities

Abstract In the field of physical activity and sports science, some controversy has currently been created by the term "sensorimotor" system, frequently simplified in error to the term of "proprioceptive system". Incorporating all of the sensory (afferent), motor (efferent), and central integration and processing components, this system serves to maintain functional joint stability during body movements. The main objective of this review is to clarify the concepts related to the sensorimotor system and understand their importance in sports training, injury prevention and return-to-play.

© 2012 Consell Català de l'Esport. Generalitat de Catalunya. Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

*Autor per a correspondència.

Correu electrònic: azaharafort@gmail.com (A. Fort).

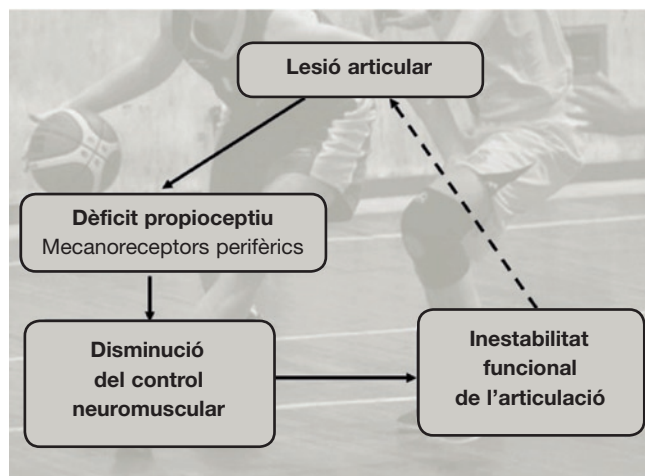


Figura 1 Cercle lesió viciós. Font: Fort³⁴. Adaptada de Lephart i Fu¹².

Introducció

Actualment sabem que participar en esports comporta risc de patir lesions, que poden, en molts casos, inhabilitar per a la pràctica esportiva¹. Particularment, algunes lesions esportives severes, com el trencament del lligament encreuat anterior i altres més habituals, com els esquinços de turmell, s'associen sovint a un augment de la morbiditat (per exemple, artrosi prematura) i discapacitat a llarg termini^{2,3}.

Les lesions esportives tenen una causa multifactorial. La classificació més coneguda és la que divideix els factors de risc en intrínsecs i extrínsecs¹, tot i que també hi ha diversos autors que els classifiquen en 4 categories: ambiental, anatòmica, hormonal i neuromuscular⁴. En la present revisió bibliogràfica centrarem principalment el motiu d'estudi en el factor neuromuscular, que, com a factor intrínsec, és un dels més modificables amb l'entrenament. Per poder incidir en la prevenció d'aquests factors de risc neuromuscular hem d'integrar-los dins de l'ampli sistema sensoriomotor. La bibliografia científica actual associa un major risc de lesions esportives a déficits en el sistema sensoriomotor, com ara l'alteració dels patrons de moviment^{5,6}, rigidesa muscular inadequada⁷, déficits en el control postural⁸, alteracions del sistema propioceptiu⁹, déficits en l'activació muscular del tronc¹⁰ i déficits en els mecanismes d'anticipació¹¹.

El funcionament correcte d'aquest complex sistema sensoriomotor és prioritari en la prevenció i readaptació de les lesions esportives. La lesió del teixit articular està relacionada amb una alteració dels mecanorreceptors, la qual cosa causa una alteració de les aferències que protegeixen l'articulació. Aquest fet pot alterar el control neuromuscular normal i, com a conseqüència, produir una disminució de l'estabilitat de l'articulació¹². Aquest procés es relaciona amb el cercle viciós lesiu (fig. 1).

La bibliografia científica més recent mostra que diversos déficits en el sistema sensoriomotor poden millorar a través de diferents tipus d'entrenament neuromuscular, com ara la millora de l'equilibri i els patrons d'activació muscular^{13,14}. A més, cal destacar que diferents tipus d'entrenament, descrits per la bibliografia com neuro-

muscular/propioceptiu, han mostrat evidència de l'eficàcia en la reducció de la incidència lesiva en adolescents i joves que participen en esports en què predominen els canvis de direcció¹⁵⁻¹⁷. Sembla que l'entrenament neuromuscular òptim és específic de cada grup de població. Per poder optimitzar l'eficàcia d'aquest tipus d'entrenament és bàsic entendre el funcionament del complex sistema sensoriomotor.

El propòsit principal del present estudi és descriure conceptes fonamentals relacionats amb les bases fisiològiques i anatòmiques del sistema sensoriomotor, per poder entendre els mecanismes responsables del manteniment de l'estabilitat funcional de l'articulació durant l'activitat esportiva.

El sistema sensoriomotor

L'expressió «sistema sensoriomotor» es presenta com la combinació dels processos neurosensorial i neuromuscular, que ha estat mal denominada i simplificada sovint amb el terme de «propiocepció». Una de les obres més representatives de l'àmbit que ens ocupa és l'escrita l'any 2000 per Scott Lephart, titulada *Proprioception and neuromuscular control in joint stability*, que explica com s'adoptà l'expressió sistema sensoriomotor per poder descriure els components següents: receptors perifèrics, integració i processament central i resposta motora. Tots ells estan implicats en el manteniment de l'homeòstasi articular durant els moviments corporals (estabilitat funcional de l'articulació)¹² (fig. 2).

Tradicionalment s'ha considerat que l'estabilitat articular és una propietat que depèn exclusivament de les estructures lligamentoses. Actualment sabem que l'estabilitat articular és considerada la funció sinèrgica en la qual els ossos, les articulacions, les càpsules, els lligaments, els músculs, els tendons, els receptors sensorials i les vies neurals espinals i corticals actuen en harmonia per garantir l'homeòstasi articular. L'estabilitat articular depèn d'estructures viscoelàstiques passives (ligaments) i d'òrgans viscoelàstics actius (músculs)¹⁸ (fig. 3). Els efectes de protecció d'aquest component passiu són deguts a la posada en tensió d'aquestes estructures, així com a la configuració geomètrica i cinemàtica de l'articulació a través del seu rang de moviment. D'altra banda, el component actiu pot exercir el seu rol protector tant de forma passiva (to muscular de repòs) com de forma activa (acció muscular reflexa o voluntària). Les respostes dinàmiques de la musculatura poden tenir lloc en qualsevol punt del rang de moviment segons la variació de paràmetres com la velocitat articular, la càrrega externa, la gravetat i el dolor, entre altres¹⁸.

Segons el que s'ha exposat fins ara, és important diferenciar entre els 3 nivells que participen en l'estabilitat dinàmica (sinònim d'estabilitat funcional) de l'articulació: procés neurosensorial, procés d'integració i processament central, i resposta neuromuscular.

Procés neurosensorial

El sistema nerviós central (SNC) obté la informació necessària per controlar els moviments del nostre cos des de 3

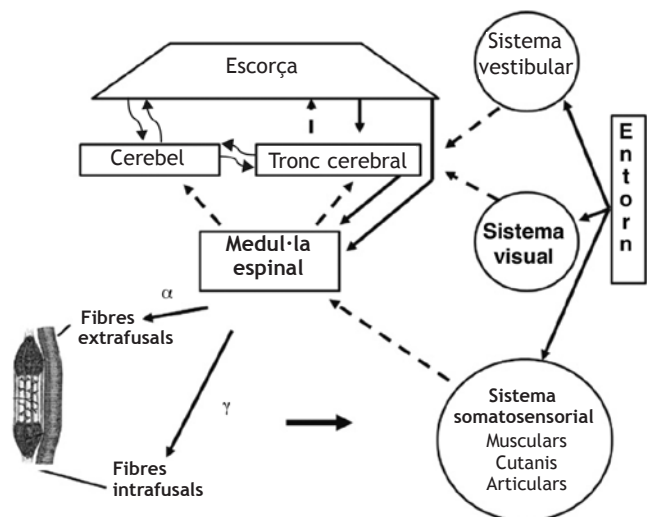


Figura 2 Sistema sensoriomotor. El sistema sensoriomotor incorpora tots els components aferents, el procés d'integració i processament central i les respostes eferents, amb l'objectiu de mantenir l'estabilitat funcional de l'articulació. Tot i que el sistema visual i vestibular hi contribueixen, els mecanoreceptors perifèrics són els més importants des de la perspectiva de l'entrenament esportiu. Els mecanoreceptors es troben en diferents parts del cos, incloses la pell, les articulacions, els lligaments, els tendons i els músculs. Les vies aferents (línies de punts) transmeten entrades a 3 nivells de control motor i s'associen a àrees com el cervell. Les neurones poden activar-se com a resposta directa a l'entrada sensorial perifèrica (reflexos) o bé davallant des de centres superiors (moviment automàtic i voluntari). Aquestes 2 vies poden ser modulades o regulades per les àrees associades (línies ondulades). Des de cada nivell de control motor (línies contínues negres) les vies eferents convergeixen amb les motoneurons gamma i alfa situades a les arrels ventrals de la medulla espinal. L'activació de les fibres musculars intrafusals i extrafusals provoca nous estímuls que són presentats als mecanoreceptors perifèrics. Font: Fort³⁴. Adaptada de Riemann i Lephart^{21,33}.

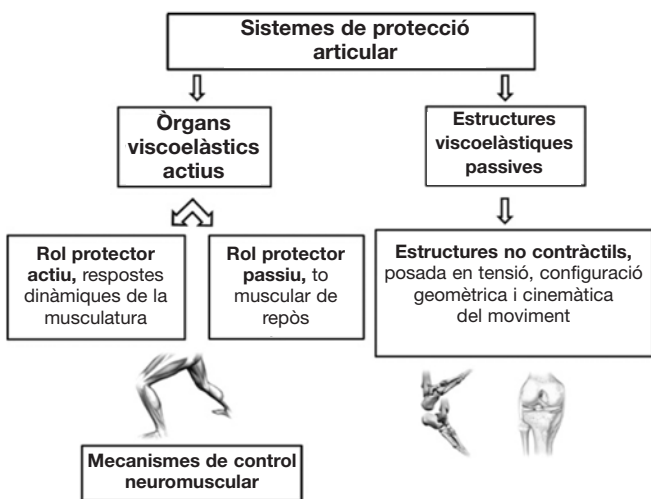


Figura 3 Sistemes de protecció articular.

subsistemes: el sistema somatosensorial, el sistema vestibular i el sistema visual^{12,19}. Des del punt de vista de l'activitat física i l'esport, malgrat que les aferències vestibulars i visuals contribueixen a la integració i descodificació de la informació per part de l'SNC, els mecanoreceptors perifèrics que formen part del sistema somatosensorial són considerats com uns dels més importants des del punt de vista de l'entrenament, la prevenció i la readaptació a la competició esportiva. És per això que en aquest text ens centrarem en aquest últim subsistema.

Sistema somatosensorial

El terme somatosensorial (o somatosensació) engloba tota la informació mecanoreceptiva (propiocepció), termoreceptiva (tacte i temperatura), dolorosa, lumínica i química derivada de la perifèria²⁰. Aquest sistema conté receptors cutanis, ossis, musculars, tendinosos i articulars. Entre els estímuls que més ens interessen trobem els de tacte, la pressió, el dolor, la posició i el moviment articular. Els receptors que detecten la sensació de posició, moviment i tensió són els habitualment denominats propioceptors¹², i per tant és important no confondre el terme somatosensorial amb el de propiocepció, ja que aquest darrer és un subcomponent del primer.

Sistema propioceptiu

Charles Scott Sherrington definí per primera vegada la propiocepció l'any 1906 com la sensació de posició i moviment de les extremitats¹². Aquest neuròleg es referia al sistema propioceptiu com la informació aferent que arriba des dels propioceptors localitzats en les articulacions, tendons i músculs, i que contribueix a la consciència de les sensacions musculars, de la postura segmentària (estabilitat articular) i de la postura global (equilibri postural). La definició de propiocepció ha creat i crea encara molta controvèrsia en la comunitat científica. De fet, és segurament el terme que més confusió produeix dins el sistema sensoriomotor. Ha estat utilitzat incorrectament com a sinònim de cinestèsia, somatosensació, equilibri, coordinació i sentit de la posició articular^{12,21}.

Actualment es defineix la propiocepció com la capacitat d'una articulació per determinar la seva posició en l'espai, detectar-ne el moviment (cinestèsia) i la sensació de resistència que hi actua sobre²¹. Aquesta capacitat és adquirida per l'estímul dels mecanoreceptors perifèrics, que converteixen aquest estímul mecànic en un senyal neural que es transmet per les vies aferents fins a ser processat per l'SNC. La propiocepció també és definida com la via aferent del sistema somatosensorial, i no inclou ni el processament del senyal sensorial per part de l'SNC ni l'activitat resultant de les vies eferents que ocasionen la resposta motora¹².

Una altra definició és la de Roberts⁹, que segueix la utilitzada per B.D. Wyke: consciència de la posició articular (sensació de posició) i consciència del moviment en l'espai (cinestèsia); i retroalimentació dels mecanoreceptors que exerceixen un efecte continu reflex i inconscient sobre el to muscular i l'equilibri, mitjançant el circuit de motoneurons gamma, per mantenir l'estabilitat dinàmica de les articulacions.

Taula 1 Receptors articulars

Tipus de receptor	Localització	Sensible a	Actiu quan l'articulació es troba	Llindar d'activació	Resposta a l'estímul persistent	Projecció
Terminacions Ruffini	Càpsula i lligament	Posició articular, pressió intraarticular, amplitud i velocitat de moviment	Estàtica o dinàmica	Baix	Adaptació lenta	Medul·la espinal, escorça sensorial
Corpuscles de Paccini	Càpsula, lligament, menisc i coixinet adipós	Acceleració o desacceleració	Solament dinàmica	Baix	Adaptació ràpida	Medul·la espinal, escorça sensorial
Receptors de Golgi	Lligament i menisc	Tensió lligaments, especialment al final del rang de moviment	Només dinàmica	Alt	Adaptació lenta	Medul·la espinal, escorça sensorial
Terminacions nervioses lliures	Àmpliament distribuïts en càpsula, lligaments, coixinet adipós, menys en el menisc	Dolor d'origen mecànic o químic	Inactiu, excepte en presència d'estímul nociu (estàtica i dinàmica)	Alt	Adaptació lenta	Medul·la espinal, escorça sensorial

Font: Solomonow i Krosgaard¹⁸; Williams et al.²²; Fort³⁴.

A partir dels diferents treballs comentats i de l'estudi realitzat sobre el tema, en el present article definim propiocepció com el tipus de sensibilitat del sistema somato-sensorial que participa en mantenir l'estabilitat dinàmica de l'articulació, la qual cosa s'aconsegueix mitjançant la detecció de les variacions de pressió, tensió i longitud dels diferents teixits articulars i musculars. Segons aquest concepte i el treball de Rienman i Lephart²¹, que tracta de la importància de diferenciar entre la recepció perifèrica i inconscient dels estímuls i el procés mitjançant el qual aquests estímuls es fan conscients, cal tenir clar que la propiocepció es refereix únicament al procés de detecció perifèrica dels mecanoreceptors. A partir d'aquí, i malgrat la controvèrsia existent entorn d'aquests conceptes, l'estabilitat articular no solament ve donada pels receptors perifèrics, sinó que també participa en la integració i el processament central de la informació i les vies motores.

Rol dels mecanoreceptors en el control del sistema neuromuscular

Tal com hem dit anteriorment, la contribució de les aferències articulars en el control motor, dins del qual, com ja s'ha exposat, incloem la posició i el sentit del moviment (propiocepció), ha estat i continua essent debatuda. Generalment, els mecanoreceptors es classifiquen en 3 grups: receptors articulars, receptors cutanis i receptors musculars. En l'actualitat se sap que aquests 3 tipus de receptors actuen

sobre la propiocepció de l'aparell locomotor, tot i que encara cal aclarir-ne les contribucions relatives⁹.

Quan aquests receptors són estimulats amb una intensitat suficient generen impulsos aferents que es propaguen fins l'SNC. Aquests senyals aferents són mediatitzats a 3 nivells de l'SNC: la medul·la espinal, el tronc cerebral i els centres cognitius (còrtex). L'SNC processa aquests senyals aferents i genera respostes motores (eferents) que modulen l'activitat muscular²².

A continuació descriurem breument els diferents tipus de receptors prenent com a model l'articulació del genoll, que és la més investigada en la literatura científica actual.

Receptors articulars

Es localitzen 4 tipus de receptors a les parts toves de l'articulació del genoll: les terminacions de Ruffini, els corpuscles de Pacini, els receptors de Golgi i les terminacions nervioses lliures^{9,12,22}. Els receptors articulars són descrits segons l'estímul i les característiques següents¹²:

- Estat de l'articulació (estàtica, dinàmica o ambdues) en què estan actius.
- Intensitat de l'estímul que determina el llindar d'activació (llindar alt o baix).
- Tipus d'adaptació a l'estímul: si els receptors segueixen actius quan l'estímul persisteix s'anomena d'adaptació lenta; en canvi, si desapareixen o disminueixen els senyals després de l'estímul, s'anomenen d'adaptació ràpida.

A la taula 1 es descriuen les principals característiques dels receptors articulars.

Receptors cutanis

Actualment no hi ha evidència que recolzi la contribució significativa dels receptors cutanis sobre l'estabilitat dinàmica de l'articulació del genoll; no obstant això, alguns autors suggereixen que aquests receptors poden informar sobre la posició i la cinestèsia (sensació de moviment) de l'articulació quan la pell és estirada^{23,24}. Tot i que amb menys importància que els receptors articulars, la contribució dels receptors cutanis sobre la posició de l'articulació és substancialment inferior a la dels receptors musculars^{22,23}.

Receptors musculars

Existeixen principalment 2 tipus de receptors: el fus neuromuscular i l'òrgan tendinós de Golgi (OTG)²⁰. La finalitat principal dels senyals que provenen d'aquests òrgans és el control de la contracció muscular de forma inconscient, que transmeten informació a la medul·la espinal, el cerebel i l'escorça cerebral, i ajuden cada un dels diferents segments de l'SNC en la funció de control del sistema neuromuscular. És important destacar que aquests receptors permeten una retroalimentació contínua d'informació sobre l'estat muscular a cada instant. Com descriurem a continuació més detalladament, el fus muscular envia informació a l'SNC sobre l'estat i la variació de la longitud del múscul. D'altra banda, l'OTG envia informació sobre la tensió muscular i la seva variació²⁰.

El primer receptor que descriurem és el fus muscular. Anatòmicament, cada fus està format per fibres intrafusals, que estan lligades a les fibres extrafusals. Hi ha 2 tipus de fibres intrafusals: les fibres de borsa nuclear i les fibres en cadena nuclear. A la part central d'aquestes fibres hi ha el component receptor; d'altra banda, els extrems tenen capacitat de contracció. Aquests receptors estan connectats a 2 tipus de terminacions sensibles: terminacions primàries o tipus I (innerva els 2 tipus de fibres intrafusals) i terminacions secundàries o tipus II (només innerva les fibres en cadena)^{20,25}. L'estimulació dels receptors del fus neuromuscular pot produir 2 tipus de respostes: estàtica, provocada per les terminacions primàries i secundàries, i dinàmica, donada solament per les terminacions primàries. Quant a les motoneurons que innerven el fus, també es poden dividir en gammadinàmiques (gamma-d) i gammaestàtiques (gamma-e). La manifestació més simple de la funció del fus muscular és l'anomenat reflex miotàtic, que, davant un estirament sobtat del múscul i, per tant, del fus, provoca una contracció reflexa instantània, molt dinàmica i de gran intensitat, de les fibres musculars que l'envolten. Amb aquest mateix estímul es provoca un altre tipus de resposta més mantinguda, anomenada reflex d'estirament estàtic, que persisteix mentre es manté el múscul en una longitud excessiva²⁰.

Tot aquest procés possibilita el manteniment de la postura i la col·locació idònia del cos o dels seus segments per aconseguir el control neuromuscular desitjat. Tal com hem exposat es tracta d'una sensació inconscient, ja que aquests receptors no produeixen una sensació de dolor, calor o fred^{12,18,22}. Es projecten a nivell de la medul·la espinal (reflexos monosinàptics) i el cerebel¹⁸.

El segon tipus de receptor muscular, els OTG, són estructures encapsulades que es disposen en sèrie a les fibres musculars extrafusals a nivell de la inserció en fàscies i tendons²⁶. Es localitzen principalment en la unió neuromuscular, on les fibres de col·lagen del tendó es fusionen amb les fibres musculars extrafusals. Els receptors de Golgi situats en el múscul/tendó es diferencien dels que estan a l'articulació, perquè són sensibles principalment als canvis de tensió muscular^{18,22}. Quan aquests receptors s'activen per una tensió muscular excessiva, envien ràpidament senyals per provocar una inhibició reflexa dels músculs amb els quals connecten, és a dir, es produeix una relaxació del múscul²⁵ que té com a funció última protegir els músculs i el teixit conjuntiu d'una càrrega excessiva²⁶. De la mateixa manera que el fus neuromuscular, tenen una resposta dinàmica que s'activa davant una tensió muscular sobtada, a la qual li segueix una resposta estàtica de menor intensitat²⁰. Aquests receptors es projecten a nivell de la medul·la espinal, el cerebel i l'escorça sensorial.

Tal com hem apuntat, sembla que els receptors musculars són els principals determinants del sentit de moviment i posició de l'articulació, i els receptors articulars i cutanis podrien tenir un rol més secundari^{18,22}.

Integració i processament central

Tots els estímuls sensorials esmentats anteriorment estan integrats en els diferents nivells de l'SNC per generar les respostes motores adequades. El control del moviment i la postura de l'individu depenen del flux continu d'informació sensorial que hi ha al seu voltant¹². Aquesta informació és enviada via aferent i processada en el que podem anomenar un eix central i 2 àrees d'associació. L'eix central correspon als 3 nivells de control motor: la medul·la espinal, el tronc cerebral i l'escorça cerebral. D'altra banda, les 2 àrees d'associació són el cerebel i els ganglis basals, responsables de la modulació i la regulació dels comandaments centrals. L'activació posterior de les neurones motores es pot donar com a resposta directa a l'entrada sensorial perifèrica (reflexos) o ser dirigida de forma descendent des del tronc de l'encèfal o còrtex cerebral²¹.

Les respostes motores, doncs, es poden situar en 3 nivells de control motor: el nivell espinal o reflex monosinàptic per respostes motores simples, el tronc de l'encèfal per la resposta immediata davant reflexos més complexos (automatismes), i l'escorça cerebral o control voluntari per controlar els moviments altament complicats¹².

Nivell de la medul·la espinal

Aquest tipus de nivell de control motor s'utilitza en circumstàncies en què s'exigeix una resposta reflexa a estímuls externs. Aquesta resposta és altament estereotipada i d'acció ràpida. Els reflexos poden ser provocats a partir de l'estimulació dels mecanoreceptors cutanis, musculars i articulars, i impliquen l'excitació de les motoneurons alfa i gamma²¹. Un dels exemples més coneguts d'aquest tipus de reflex és el de l'estirament.

Nivell del tronc encefàlic

Es relaciona amb respostes intermèdies i automàtiques, però no tan estereotipades com el reflex espinal. Conté els principals circuits que controlen l'equilibri postural i molts dels moviments estereotipats i automàtics del cos humà²¹. A més d'estar sota comandament cortical directe i de presar una estació indirecta de transmissió entre l'escorça i la medulla espinal, les àrees del tronc cerebral regulen i modulen de forma directa les activitats motores basades en la integració de la informació sensorial que prové de la font visual, vestibular i somatosensorial^{12,21}.

Nivell de l'escorça cerebral

És el nivell més alt de control motor, en què la informació procedent dels diferents sistemes sensitius és descodificada i processada per la consciència cognitiva. Aquest fet permet crear estratègies motores complexes, la qual cosa possibilita el que es coneix com a moviment voluntari.

Àrees associades

Malgrat que les 2 àrees d'associació, el cerebel i els ganglis basals, no poden iniciar de forma independent l'activitat motora, són indispensables per a la seva regulació continuada, la qual cosa permet l'execució coordinada de la resposta motora^{12,21}.

Resposta neuromuscular

A l'apartat anterior s'han descrit 3 tipus de resposta motora en funció dels diferents nivells de l'SNC que hi intervenen. Aquesta resposta està estretament relacionada amb el concepte de control del sistema neuromuscular i, per tant, de l'estabilitat dinàmica de l'articulació. El control neuromuscular és un terme utilitzat sovint en moltes disciplines per referir-se al control motor. Es refereix a tots els aspectes que envolten el control del sistema nerviós en l'activació muscular i als factors que contribueixen al rendiment de les tasques motores²⁷.

Lephart i Fu¹² interpreten el control neuromuscular com la resposta eferent inconscient a un senyal aferent que té com a objectiu aconseguir l'estabilitat dinàmica de l'articulació. D'altra banda, Williams et al.²² defineixen el control neuromuscular com la capacitat per produir un moviment controlat mitjançant una activitat muscular coordinada, la qual és el resultat d'una complexa interacció entre el sistema nerviós i el sistema musculoesquelètic.

Seguint aquests autors, definim el control neuromuscular com l'activació muscular precisa que possibilita el desenvolupament coordinat i eficaç d'una acció. És important parlar de les diferents estratègies de control neuromuscular per dur a terme una acció coordinada i eficaç, tal com fem a continuació.

Coordinació intramuscular

Un dels principals factors neurals que afecten la força és la coordinació intramuscular d'un mateix múscul. Aquest fet

implica diversos mecanismes de control, entre els quals es donen: el reclutament espacial (augment del nombre d'unitats motores reclutades), el reclutament temporal (augment de la freqüència d'impulsos d'unitats motores) i la sincronització de les diferents unitats motores per produir una contracció voluntària màxima^{28,29}.

Coordinació intermuscular

La literatura actual descriu sobretot 2 principis neuromusculars sobre la programació de la intervenció muscular en un moviment³⁰: 1) coactivació d'agonistes i antagonistes i 2) activació recíproca d'agonistes i antagonistes.

Solomonow i Krogsgaard¹⁸ definiren la coactivació com una activitat d'alta intensitat de la musculatura agonista simultània a una activitat de baixa intensitat de la musculatura antagonista d'una mateixa articulació. Malgrat això, cal tenir en compte que aquests nivells d'activació a què es refereixen poden no tenir sempre aquesta proporció, perquè depèn del tipus de treball realitzat. La coactivació és utilitzada sobretot quan es realitzen accions noves i/o balístiques, quan la velocitat d'execució augmenta, i quan cal donar estabilitat per mantenir una posició articular constant³⁰. Ford et al.³¹ conclouen en la seva revisió sistemàtica que la coactivació antagonista de la musculatura isquiosural és evident durant les accions dinàmiques de la cadena cinètica tancada. El manteniment d'aquesta posició de coactivació esdevé un patró d'estabilització articular que provoca una reducció de la càrrega que poden sofrir les estructures lligamentoses i articulars^{18,30}. En canvi, l'existència d'una coactivació no desitjada provoca una disminució de la velocitat d'execució, una major despesa energètica i, paral·lelament, una disminució del rendiment.

Quant a l'activació recíproca a què es refereix Lloyd, ve donada pel principi neuromuscular d'inhibició recíproca, que consisteix en la inhibició d'un múscul per facilitar la contracció del seu antagonista²⁰. Aquesta estratègia és utilitzada preferentment en molts moviments poliarticulars automatitzats, com per exemple aixecar-se d'una cadira o durant la marxa³⁰.

Hi ha una relació complexa entre aquests 2 mecanismes de control neuromuscular per garantir l'eficiència del moviment i l'estabilitat articular³¹. Actualment sabem que les estratègies neuromusculars són modificables amb l'entrenament^{15,32}. D'aquesta manera, quan s'aprenen nous moviments, la tasca es realitza en primer lloc amb nivells elevats de coactivació, i a mesura que es realitza l'aprenentatge hi ha una progressió cap a l'activació recíproca³⁰. És a dir, en les accions produïdes a l'esport cal arribar a un equilibri entre la coactivació, que dona estabilitat i protecció a l'articulació, i l'activació recíproca, que pot augmentar l'eficiència muscular de l'acció esportiva.

A part d'aquestes estratègies, és important ressaltar que el control dinàmic de l'articulació està influït per 2 mecanismes de control motor, anomenats en anglès *feedback* (retroalimentació, via reflexa) i *feedforward* (preactivació)^{31,33}. La retroalimentació es refereix a la resposta donada via reflexa per un estímul sensorial. D'altra banda, els mecanismes de control de preactivació són descrits com les accions d'anticipació que tenen lloc abans de la detecció

sensorial d'una disrupció de l'homeòstasi i que es basen en experiències anteriors. D'una banda, el retard electromecànic, que és inherent al mecanisme de retroalimentació, pot limitar l'eficàcia de la protecció articular proporcionada per la musculatura implicada. En canvi, són adequats per mantenir la postura i els moviments més lents. D'altra banda, el mecanisme de preactivació involucra una preparació mitjançant l'anticipació de la càrrega o el moviment. Aquesta preparació pot ser apresada i ajustada a les diferents accions que es presenten mitjançant l'acumulació d'experiències motores. A mesura que un esportista adquireix més experiència, els models de coactivació inadequats desapareixen i són substituïts per patrons musculars més coordinats per desenvolupar una bona estabilitat dinàmica articular i un moviment eficaç, ja que perquè una acció pugui resultar òptima ha de complir aquests dos aspectes³¹. Tot i que actualment no existeix evidència que ratifiqui aquesta explicació, extreta dels autors comentats, aquesta teoria sobre l'evolució del control motor segons l'experiència motora té aspectes ben fonamentats.

Control postural

Dins d'aquest apartat, és important definir el control postural, que depèn de la capacitat de l'individu de controlar el sistema neuromuscular. Aquest control implica el domini de la posició del cos en l'espai amb els objectius d'estabilitat i orientació. L'estabilitat postural, també anomenada equilibri, es defineix com la capacitat per mantenir el centre de gravetat corporal dins la base de sustentació. D'altra banda, l'orientació postural es refereix a l'habilitat de mantenir una correcta relació entre els propis segments del cos i entre aquests i l'entorn, a l'hora de realitzar una tasca^{8,9}. Finalment, dins d'aquest apartat, cal tenir present que el manteniment d'aquest control postural ve donat per 3 fonts d'informació sensorial¹²: la retroalimentació somatosensorial dels receptors perifèrics, la visió i el sistema vestibular.

Conclusions i aplicacions pràctiques

El funcionament perfecte del sistema sensoriomotor és bàsic per controlar els diferents nivells de resposta motora, així com per executar de forma coordinada i eficaç les diferents tasques motores desenvolupades en les activitats esportives. El sistema sensoriomotor no pot entendre's com la simple entrada i sortida d'estímul, sinó que es tracta d'un sistema complex format per les vies aferents, de processament i integració de la informació, i les respostes eferents, la qual cosa permet mantenir l'homeòstasi articular en les tasques motores més exigents.

És bàsic que es tinguin en compte les diferents estratègies de control neuromuscular (coordinació intramuscular i intermuscular) per dur a terme una acció coordinada i eficaç, així com la regulació de la rapidesa de les respostes en funció del nivell de control i processament de la informació per l'SNC. En relació amb l'anterior, és importantíssim equilibrar els principis neuromusculars de coactivació dels agonistes i antagonistes i l'activació recíproca per assegurar el màxim rendiment amb la major protecció articular

possible. A part de les estratègies esmentades, cal ressaltar els mecanismes de retroalimentació i anticipació per assegurar el control neuromuscular òptim durant les accions esportives.

La comprensió del funcionament d'aquest sistema ofereix les bases per poder planificar els entrenaments neuromusculars més adequats i d'aquesta manera assegurar l'estabilitat funcional de les articulacions durant activitats com els canvis de direcció o recepcions de salt, relacionades amb una alta incidència lesiva. No sols és important treballar aquest sistema en l'àmbit de la prevenció i el tractament de lesions, sinó també per millorar el rendiment esportiu.

Conflicte d'interessos

Els autors declaren que no tenen cap conflicte d'interessos.

Bibliografia

1. Bahr R, Holme I. Risk factors for sports injuries—a methodological approach. *Br J Sports Med.* 2003;37:384-92.
2. Adirim TA, Cheng TL. Overview of injuries in the young athlete. *Sports Med.* 2003;33:75-81.
3. Cheng TL, Fields CB, Brenner RA, Wright JL, Lomax T, Scheidt PC, et al. Sports injuries: An important cause of morbidity in urban youth. *Pediatrics.* 2000;105:e32.
4. Griffin LY, Albohm MJ, Arendt EA, Bahr R, Beynon BD, Demaio M, et al. Understanding and preventing noncontact anterior cruciate ligament injuries: A review of the Hunt Valley II meeting, January 2005. *Am J Sports Med.* 2006;34:1512-32.
5. Kernozek TW, Torry MR, Iwasaki M. Gender differences in lower extremity landing mechanics caused by neuromuscular fatigue. *Am J Sports Med.* 2008;36:554-65.
6. Lloyd DG, Buchanan TS, Besier TF. Neuromuscular biomechanical modeling to understand knee ligament loading. *Med Sci Sports Exerc.* 2005;37:1939-47.
7. Granata KP, Padua DA, Wilson SE. Gender differences in active musculoskeletal stiffness. Part II. Quantification of leg stiffness during functional hopping tasks. *J Electromyogr Kinesiol.* 2002;12:127-35.
8. Ageberg E. Postural control in single-limb stance in individuals with anterior cruciate ligament injury and uninjured controls. Lund, Sweden: Lund University; 2003.
9. Roberts D. Sensory aspects of knee injuries. Lund, Sweden: Lund University; 2003.
10. Zazulak BT, Hewett TE, Reeves NP, Goldberg B, Cholewicki J. Deficits in neuromuscular control of the trunk predict knee injury risk: A prospective biomechanical-epidemiologic study. *Am J Sports Med.* 2007;35:1123-30.
11. Besier TF, Lloyd DG, Ackland TR, Cochrane JL. Anticipatory effects on knee joint loading during running and cutting maneuvers. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;33:1176-81.
12. Lephart SM, Fu FH. Proprioception and neuromuscular control in joint stability. Champaign, IL: Human Kinetics; 2000.
13. McLean SG, Walker KB, van den Bogert AJ. Effect of gender on lower extremity kinematics during rapid direction changes: An integrated analysis of three sports movements. *J Sci Med Sport.* 2005;8:411-22.
14. Wikstrom EA, Tillman MD, Kline KJ, Borsa PA. Gender and limb differences in dynamic postural stability during landing. *Clin J Sport Med.* 2006;16:311-5.

15. Hübscher M, Zech A, Pfeifer K, Hänsel F, Vogt L, Banzer W. Neuromuscular training for sports injury prevention: A systematic review. *Med Sci Sports Exerc.* 2010;42:413-21.
16. Pasanen K, Parkkari J, Pasanen M, Hiiilloskorpi H, Mäkinen T, Jarvinen M, et al. Neuromuscular training and the risk of leg injuries in female floorball players: Cluster randomised controlled study. *BMJ.* 2008;337:a295.
17. Soligard T, Myklebust G, Steffen K, Holme I, Silvers H, Bizzini M, et al. Comprehensive warm-up programme to prevent injuries in young female footballers: Cluster randomised controlled trial. *BMJ.* 2008;337:a2469.
18. Solomonow M, Krogsgaard M. Sensorimotor control of knee stability. A review. *Scand J Med Sci Sports.* 2001;11:64-80.
19. Hewett TE, Paterno MV, Myer GD. Strategies for enhancing proprioception and neuromuscular control of the knee. *Clin Orthop Relat Res.* 2002;402:76-94.
20. Guyton AC. *Textbook of Medical Physiology.* 8th ed. Philadelphia: W.B. Saunders Company; 1992.
21. Riemann BL, Lephart SM. The sensorimotor system. Part II: The role of proprioception in motor control and functional joint stability. *J Athl Train.* 2002;37:80-4.
22. Williams GN, Chmielewski T, Rudolph K, Buchanan TS, Snyder-Mackler L. Dynamic knee stability: current theory and implications for clinicians and scientists. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2001;31:546-66.
23. Edin B. Cutaneous afferents provide information about knee joint movements in humans. *J Physiol.* 2001;531 Pt 1:289-97.
24. Matsusaka N, Yokoyama S, Tsurusaki T, Inokuchi S, Okita M. Effect of ankle disk training combined with tactile stimulation to the leg and foot on functional instability of the ankle. *Am J Sports Med.* 2001;29:25-30.
25. Thibodeau G, Patton K. *Anatomía y fisiología.* 6.ª ed. Madrid: Elsevier; 2007.
26. López Chicharro J, Fernández Vaquero A. *Fisiología del ejercicio.* 3.ª ed. Madrid: Médica Panamericana; 2006.
27. Riemann BL, Myers JB, Lephart SM. Sensorimotor system measurement techniques. *J Athl Train.* 2002;37:85-98.
28. Cometti G. *Los métodos modernos de musculación.* 4.ª ed. Barcelona: Paidotribo; 2007.
29. Tous Fajardo J. *Nuevas tendencias en fuerza y musculación.* Barcelona: Ergo; 1999.
30. Lloyd DG. Rationale for training programs to reduce anterior cruciate ligament injuries in Australian football. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2001;31:645-54.
31. Ford KR, van den Bogert J, Myer GD, Shapiro R, Hewett TE. The effects of age and skill level on knee musculature co-contraction during functional activities: A systematic review. *Br J Sports Med.* 2008;42:561-6.
32. Hewett TE, Ford KR, Myer GD. Anterior cruciate ligament injuries in female athletes: Part 2: A meta-analysis of neuromuscular interventions aimed at injury prevention. *Am J Sports Med.* 2006;34:490-8.
33. Riemann BL, Lephart SM. The sensorimotor system, Part I: The physiologic basis of functional joint stability. *J Athl Train.* 2002;37:71-9.
34. Fort A. *Valoració i entrenament del control neuromuscular per a la millora del rendiment esportiu [tesis doctoral].* Barcelona: FPCEE. Blanquerna. Universitat Ramon Llull; 2010.