

CENNI DI BIOMECCANICA DELLA CAVIGLIA E DEL PIEDE

Autori:

V.R. CORBO, Unità Specialistica Piede e Caviglia, USPeC, resp. Dr. U. Alfieri Montrasio, IRCCS Galeazzi, Milano

M. PALMUCCI, podologo, Milano

S.E. DE MARTINIS, Unità operativa complessa centro patologie reumatiche, A.S.S.T.

Pini-CTO, Milano

U. ALFIERI MONTRASIO, resp. Unità Specialistica Piede e Caviglia, USPeC, IRCCS Galeazzi, Milano

Per affrontare la patologia del trauma della caviglia e del piede, bisogna conoscere bene la biomeccanica del piede e della caviglia per comprendere quali alterazioni si possano verificare.

“la biomeccanica esamina gli effetti delle forze di tessuti viventi. È un'area di studio un po' specifica, poiché l'estrapolazione di principi ingegneristici derivati da materiali inorganici omogenei a sistemi biologici disomogenei è associata a limitazioni qualitative significative. Tuttavia, un apprezzamento della biomeccanica è importante per la comprensione e la gestione dei pazienti...”. (1)

L'articolazione tibiotarsica (TT) è un ginglymo, presenta capi articolari cilindrici, uno concavo e l'altro convesso, che permettono ampi movimenti angolari; è un'articolazione triplanare, che effettua movimenti di prono-supinazione. L'art. TT ha un asse inclinato di 82° rispetto al piano sagittale, 8° rispetto al piano trasverso e $20-30^\circ$ rispetto al piano frontale. (2) L'asse è diretto da laterale, posteriore e plantare a mediale, anteriore e dorsale, clinicamente lo si può approssimare con la linea che congiunge i malleoli. La componente di movimento più rilevante in clinica, nella fisiologia, è la dorsi/plantar-flessione, tuttavia, soprattutto nella patologia, possono aumentare i movimenti sugli altri piani. L'art. TT include 3 articolazioni: astragalo-tibiale, astragalo-peroneale e tibio-peroneale. L'art. TT è molto stabile grazie alla sua struttura anatomica di mortaio. La membrana interossea e il legamento interosseo aiutano ad aumentare la stabilità, prevenendo la separazione tra tibia e perone. Inoltre, la caviglia è più stabile in dorsiflessione poiché l'astragalo è più ampio anteriormente, il che consente un adattamento più stretto. Una piccola quota di rotazione anteriore e posteriore del perone si verifica durante la dorsi/plantar-flessione, poiché la faccetta del perone è più grande di quella tibiale. Siccome le superficie articolari sono congruenti al 90%, l'asse istantaneo di movimento si muove molto poco, di conseguenza l'art. della caviglia si avvicina molto a una cerniera. Per misurare il movimento dell'art TT i condili femorali devono essere prima posizionati sul piano frontale, ginocchio esteso, l'art. sottoastragale (SA) deve trovarsi in posizione neutra e l'art. Mediotarsica (MDT) deve trovarsi a fondo corsa pronatorio, e rimanere bloccata. Se l'art. MDT si sblocca, durante la misurazione del range di movimento (ROM) dell'art. TT avremo una falsa stima, poiché ai gradi di dorsiflessione dell'art. TT si aggiungeranno i gradi di dorsiflessione della pronazione di SA e MDT. L'art. TT viene spinta in dorsiflessione fino a incontrare la prima resistenza, normalmente i gradi minimi richiesti sono 10° . Se a ginocchio esteso, l'art. TT non raggiunge questi gradi di dorsiflessione, si flette il ginocchio e si verifica se recupera movimento (test di Silfverskiöld (3)); se l'art. TT recupera a ginocchio flesso gradi di dorsiflessione, vuol dire che la limitazione è dettata dai gemelli, se non recupera potrebbe essere il muscolo soleo, quindi apprezzeremo una tensione comunque sul tendine d'Achille, oppure un blocco articolare osseo. Questi gradi di dorsiflessione sono richiesti durante il ciclo del passo, nel 2° rocker o rocker di caviglia, quando il piede è in appoggio monopodalico e per avanzare la tibia deve dorsiflettere passivamente sul piede. La plantarflessione dell'art TT è misurata nello stesso modo, prestando attenzione ad evitare che l'art SA supini. Normalmente il ROM varia da $40-70^\circ$. Tuttavia è difficile isolare la plantarflessione pura della caviglia da quella del piede. In catena cinetica aperta (2) alla dorsiflessione dell'art. TT si associa abduzione ed eversione (4) del piede e all'inversione dell'art. TT si associa adduzione e inversione. In catena cinetica chiusa alla dorsiflessione dell'art. TT si associa intrarotazione di gamba e abduzione del piede, alla plantarflessione extrarotazione di gamba e adduzione del piede. La stabilità e l'integrità di questa articolazione è data sia dai tessuti molli che dalla geometria articolare. La limitazione in plantarflessione è data dalla tensione esercitata dal legamento peroneo astragale anteriore (PAA), dal blocco osseo prodotto dal contatto tra il tubercolo posteriore dell'astragalo e il margine posteriore della tibia. La limitazione in dorsiflessione è data dalla tensione del tricipite surale, dalla porzione posteriore del legamento deltoideo e dal legamento peroneo-astragale posteriore (PAP), dal contatto della porzione anteriore della troclea astragale e la superficie distale di tibia e perone.

L'articolazione sottoastraglica (SA) è un'articolazione triplanare che provvede a pronare e supinare il piede. Anatomicamente è costituita da 3 articolazioni: la SA posteriore che include la faccetta astraglica concava e quella calcaneare convessa e prevede movimenti di scivolamento; la SA anteriore che include la faccetta mediale e anteriore convessa dell'astragalo e quella concava del calcagno, che prevedono movimenti di scivolamento e rotazione. Come risultato dell'orientamento concavo-convesso opposto dell'articolazione posteriore rispetto alle articolazioni centrale e anteriore. Quando l'astragalo si sposta sulla faccetta calcaneare posteriore, l'astragalo dovrebbe scorrere nella stessa direzione del movimento di scorrimento. Poiché l'articolazione media e anteriore hanno un orientamento opposto, l'astragalo dovrebbe scorrere nella direzione opposta. Inoltre, quando si verifica il movimento di pronazione, l'astragalo avanza anteriormente sul calcagno. Il seno del tarso è diretto da leggermente anteriore al malleolo peroneale lateralmente, a poco al di sotto del malleolo tibiale medialmente; appena superiore al sustentaculum tali. I legamenti che percorrono l'intera lunghezza del seno del tarso contribuiscono a rendere l'art. SA molto stabile e difficile da dislocarsi. Nel paziente teoricamente normale, l'asse dell'art. SA si trova inclinato di 42° rispetto al piano trasversale, 48° rispetto al piano frontale e $16-23^\circ$ rispetto al piano sagittale. (2) L'asse è orientato da laterale, plantare e posteriore a mediale, dorsale e anteriore passando per l'aspetto dorso-mediale dell'astragalo, fornendo pronazione e supinazione. In base alla posizione dell'asse, la quantità di abduzione e adduzione (piano trasversale) si verificherà molto vicino a un rapporto 1: 1 con la quantità di inversione ed eversione (piano frontale); sebbene il movimento sul piano frontale sarà leggermente maggiore. La valutazione della quantità di movimento rispetto a ogni piano e la determinazione della posizione neutra secondo la biomeccanica classica di Root (5) si ottengono confrontando una bisezione dell'aspetto posteriore del 1/3 inferiore della gamba con una bisezione della superficie posteriore del calcagno mentre il paziente è in posizione prona. La posizione neutra dell'art. SA rappresenta la posizione dell'art. SA in cui la minor quantità di forze torsionali e la maggior quantità di forze di compressione attraversano l'articolazione. In quel punto l'articolazione dovrebbe trovarsi nella sua posizione più congrua, ovvero quella in cui l'art. SA non è né pronata né supinata. Una volta palpata la posizione neutra, la posizione può essere ricontrollata determinando se il piede e la gamba "si muovono come un'unità" quando il piede viene spostato da un lato all'altro sul piano frontale. Questo rappresenta effettivamente il punto in cui le forze di compressione sono maggiori attraverso l'art. SA. Inoltre, l'articolazione della caviglia deve essere dorsiflessa dritta sul piano sagittale, le concavità sopra e sotto il malleolo laterale devono essere uguali e il bordo laterale del piede deve essere relativamente dritto. È importante ricordare che è considerata fisiologica la posizione neutra di $0-2^\circ$ invertiti. Poiché qualsiasi grado significativo di art. SA in valgo è considerato relativamente raro, un riscontro di SA in valgo dovrebbe essere rivalutato e forse rimisurato. Un punto chiave da ricordare è che un piede con una posizione neutra di SA in varo non dovrebbe essere indicato come un tipo di piede "supinato". Per definizione, se l'art. SA è in posizione neutra, l'art. SA non è né supinato né pronato. Inoltre, un paziente con una posizione neutra di SA in varo produce più comunemente un piede pronato per compensare il varo di SA. Quando l'art. SA prona in catena cinetica chiusa si verifica che il calcagno everte, l'astragalo adduce e plantarflette, al contrario quando supina, il calcagno inverte e l'astragalo abduce e dorsiflette. L'art. SA trasferisce le forze che provengono dall'arto inferiore al piede e viceversa, è la nostra chiave di volta. A questa articolazione spetta il compito di adattare il piede ai diversi terreni e richieste funzionali, alternando il piede da adattatore mobile a una leva rigida in grado di sostenere il corpo e dare spinta.

Secondo il prof. Pisani parlare oggi di art. SA è un artefatto culturale, non una realtà anatomica o funzionale. È corretto parlare di calcaneal articular complex CACJ, ovvero di 3 art. la calcaneo-cuboidea, che è un artrodia e complanare al piano frontale, la SA propriamente detta che è una condilica e permette la pronazione del calcagno e la talo-calcaneo-navicolare che è un'enartosi per il movimento di rotazione.

L'art. mediotarsica (MDT) o art. di Chopart è composto da due articolazioni: l'articolazione astragaloscafoidea e l'articolazione calcaneocuboidea. Le sue principali funzioni sono: a) Rendere il

piede un adattatore mobile per ricevere le GRF al contatto con il terreno, b) Diventare una leva rigida efficace in fase propulsiva; c) Lavorare insieme all'art. SA e alle altre art del piede per permettere la propria funzione del piede

Scolasticamente l'art MDT ha 2 assi di movimento, entrambi triplanari: l'asse longitudinale (ALAM) e l'asse obliquo (AOAM). (5) È importante capire che gli assi dell'art. MDT sono principalmente teorici. Il dibattito considerevole ruota attorno al fatto che questi assi teorici siano o meno descrizioni accurate dell'art. MDT. Inoltre, alcuni biomeccanici attribuiscono un asse all'articolazione talonavicolare e l'altro all'articolazione calcaneocuboidea, mentre altri ritengono che gli assi teorici coinvolgano entrambe le articolazioni che lavorano insieme. Didatticamente, i due assi continuano ad essere utilizzati per aiutare a spiegare le complessità della funzione. Sia l'ALAM che l'AOAM forniscono pronazione e supinazione con all'incirca lo stesso orientamento dell'asse dell'art. SA (posteriore, plantare e da laterale ad anteriore, dorsale e mediale). Poiché gli assi sono indipendenti l'uno dall'altro, anche i loro movimenti possono essere indipendenti. In altre parole, un asse può essere supinato mentre l'altro asse è in pronazione. Normalmente ALAM è inclinato di 15° rispetto al piano trasversale e 9° rispetto al piano sagittale, 75° rispetto al piano frontale, quindi la sua componente principale di movimento è sul piano frontale, ovvero inversione ed eversione. AOAM è inclinato 52° rispetto al piano trasversale, 57° rispetto al piano sagittale, 38° rispetto al piano frontale, quindi la componente principale di movimento è rispettivamente dorsi/plantar-flessione associato a ab/ad- duzione. Clinicamente è difficile individuare ogni singola componente del movimento dell'art. MDT, tuttavia in patomeccanica spesso prevale una componente su un piano es. in un piede pronato può prevalere l'abduzione dell'art. MDT. L'art. MDT rappresenta la relazione tra avampiede e retropiede. Nella sua posizione di fine corsa pronatorio, si dice che è la sua posizione di blocco ed avviene quando SA è in neutra. Il ROM dell'art. MDT non è misurato durante l'esame clinico, ma viene valutato in base alla qualità del movimento, all'evocazione di eventuali dolori o alla sua limitazione. Normalmente quando l'art. SA prona, l'art. MDT aumenta il suo range di movimento, quando l'art. SA supina, viceversa, la MDT riduce il suo range di movimento. Attualmente le nuove teorie biomeccaniche spiegano come l'art. MDT sia un'art. focale nella mediazione tra retropiede e avampiede, poiché l'equilibrio dei momenti che durante il ciclo del passo si generano a livello dell'art. MDT mantengono la corretta funzionalità del piede.

L'art. del 1 raggio (R1) comprende l'art. tra cuneiforme mediale e scafoide e tra 1^a metatarsale (M1) e 1^a cuneiforme (C1), è considerata come un'unità funzionale. L'asse di movimento di R1 è un asse triplanare, diretto da anteriore, laterale e plantare a posteriore, mediale e dorsale; inclinato di 45° rispetto al piano frontale e sagittale, e di 9° rispetto al piano trasversale, quindi clinicamente i movimenti più significativi sono inversione/dorsiflessione ed eversione/plantarflessione, a cui si associa rispettivamente adduzione e abduzione. Le funzioni principali di R1 (6) sono: 1) fornire un supporto alle strutture mediali dell'avampiede decelerando la pronazione di SA, stabilizzandola accelerando la supinazione. Nel suo ruolo come supporto delle strutture mediali dell'avampiede, R1 genera delle GRF significative che servono a spostare il CoP (centro di Pressione) medialmente sull'avampiede. Lo spostamento mediale del CoP aumenterà sia l'ampiezza del momento supinatorio di SA, sia ridurrà lo stesso a seconda che sia necessario prevenire il momento pronatorio o promuovere il momento supinatorio di SA. (7) 2) fornire un supporto alle strutture mediali dell'avampiede riducendo il rischio di aumento delle GRF sulle teste dei MT adiacenti. In presenza di M1 breve o metatarsus primus elevatus o una diminuzione nella stiffness di R1, la sua capacità di generare GRF e/o resistere al movimento di dorsiflessione è ridotta, di conseguenza vi è il trasferimento delle GRF sulla testa di M2. (fig1.)

In aggiunta, quando la testa di M1 è incapace di sopportare il carico di forze, aumenterà le GRF sulla testa di M2 attraverso il momento pronatorio di SA. 3) Permettere di variare selettivamente la sua capacità di resistenza alla forze di carico o in altre parole di alterare la stiffness durante l'attività in carico. 4) Permettere il normale movimento dell'art. metatarso-falangea 1 (MF1) 5) Permettere un

inserzione dei tendini dei m. estrinseci del piede su una struttura stabile (es. m. peroneo lungo (PL)).

Attualmente la biomeccanica odierna sostituisce il concetto di “ipermobilità” di R1, con la sua proprietà di stiffness, questo riflette meglio il concetto naturale di meccanica a molla di R1 (8). Infatti quando R1 ha una ridotta stiffness, dorsifletterà maggiormente per una data forza di carico sulla testa di M1 ed eserciterà una minor forza di reazione alle GRF; quando invece R1 ha un aumentata stiffness, dorsifletterà meno per una data forza di carico sulla testa di M1 data la sua capacità di supportare il carico. Durante il cammino quando la GRF aumenta a livello della testa di M1, il CoP si sposta medialmente, al contrario quando la GRF si riduce a livello della testa di M1, il CoP si sposta lateralmente. (7) questi cambiamenti sono ciò che con il perdurare del tempo portano a deformità quali alluce addotto valgo e alluce rigido. Esistono 3 condizioni che aumentano le GRF plantarmente alla testa di M1 e quindi inducono R1 a dorsiflettere e sono: 1) calcagno evertito, 2) avampiede valgo flessibile, R1 plantarflesso (9).

L'articolazione metatarso-falangea I (MF1) è un complesso articolare costituito dalla testa del I metatarsale, dalla base della falange prossimale (P1) dell'alluce e dalle ossa sesamoidi e infine, ma non di meno importanza, dai legamenti intersesamoidei. L'art. MF1 ha due assi di movimento e quindi due gradi di libertà di movimento: un asse orizzontale per il movimento sul piano sagittale di plantarflessione - dorsiflessione, un asse verticale per il movimento sul piano orizzontale di abduzione-adduzione, clinicamente meno rilevante. (5) Per effettuare questi movimenti l'art. MF1 si comporta come un ginglymo-artrodia, ovvero i due capi articolari (testa di M1 e base P1) compiono prima un movimento di rotazione e in seguito di scivolamento l'uno sull'altro per consentire la massima dorsiflessione dell'alluce. Al fine di una fisiologica deambulazione, l'art. MF1 deve raggiungere un'ampiezza di 65-75° di dorsiflessione. Per consentire questo range di movimento l'articolazione si comporta prima come un ginglymo, quindi durante questa prima fase la base di P1 ruota sulla testa di M1, il centro di rotazione di tale movimento risiede sull'asse orizzontale, raggiungendo un grado di dorsiflessione di circa 30°. A questo segue la seconda fase in cui il restante range di dorsiflessione è consentito dallo scivolamento della base di P1 del I dito sulla testa di M1, quindi in codesta fase l'articolazione si comporta come un'artrodia. Affinché la seconda fase di dorsiflessione dell'art. MF1 avvenga, devono sussistere delle condizioni necessarie per far avvenire questo scivolamento, ovvero è necessaria la plantarflessione di M1. Quest'ultima permette uno spostamento dell'asse orizzontale dell'art. MF1 in direzione dorsale e posteriore. Così facendo la superficie articolare dorsale della testa di M1 è libera di articolarsi con la base di P1 dell'alluce e questa può scivolare dorsalmente sulla testa di M1, completando il range di dorsiflessione. La plantarflessione di M1 è necessaria per la dorsiflessione dell'art. MF1 e dipende da una serie di fattori presenti prevalentemente nella fase di midstance nel ciclo del passo: il sollevamento del tallone dal suolo sposta il carico sul metatarsale più lungo (in genere M2) e ciò riduce le reazioni verticali del terreno, consentendo a M1 di plantarflettere. M1 viene plantarflesso dal muscolo peroneo lungo che diventa efficace per la plantarflessione solo quando l'art. SA è supinata; questo perché il muscolo peroneo lungo si riflette sotto il cuboide e raggiunge il M1 con un'inclinazione dal basso verso l'alto, quindi risulta efficace. Pertanto esistono delle condizioni affinché avvenga la plantarflessione di M1 e sono: Sollevamento del tallone, Supinazione dell'articolazione sottoastragalica e Index minus. La plantarflessione di M1 è necessaria sia per consentire la dorsiflessione dell'art. MF1 e sia per stabilizzare al suolo M1. La plantarflessione di M1 comporta una sua verticalizzazione e in questa situazione il metatarsale risulta sottoposto prevalentemente a forze compressive (stabilizzanti) invece che a momenti di forza rotatoria (destabilizzanti). Quando si verifica la plantarflessione di M1, la base di P1 del I dito scivola sulla testa metatarsale e raggiunge i 65-75° di dorsiflessione necessari all'alluce al termine della fase di propulsione. Infatti in quest'ultima fase la tibia si trova inclinata in avanti di 45°circa, il piede risulta esser inclinato rispetto alla tibia di 20°, in questo modo l'angolo compreso tra l'asse del metatarsale e il piano di appoggio è di circa 65-75°. Qualora non si verifichi la plantarflessione di M1, non si completa la dorsiflessione della MF1, quindi si verifica un

“impingement” tra la base della P1 dell’alluce e la testa di M1. Questo crea in un piede con morfotipo retto, ovvero angolo fisiologico di abduzione metatarso-falangeo nullo o minimo, processi degenerativi articolari e reazioni condrofitosiche e osteofitosiche localizzate soprattutto sul dorso della testa di M1 e tipiche dell’alluce rigido. In un piede con morfotipo addotto, quindi con angolo metatarso-falangeo elevato, il fenomeno innesca una progressiva deformazione in abduzione e valgismo dell’alluce. La plantarflessione di M1 è impedita ogniqualvolta ci si ritrovi in queste condizioni: a) alterazioni strutturali o funzionali sovrapodaliche o podaliche che implicano una pronazione anomala dell’art. SA b) Dorsiflessione di M1 secondaria a pronazione anomala dell’art. SA o primitiva es. metatarsus primus elevatus c) Index plus: anche in questo caso si determina lo sviluppo dell’alluce rigido, poiché dopo la fase di stacco del tallone dal suolo le forze di reazione del terreno sono tutte a carico di M1 e questo rende impossibile la sua plantarflessione.

In caso di primus metatarsus elevatus la plantarflessione di M1 non permette un corretto spostamento dell’asse orizzontale della MF1 in direzione dorsale e posteriore, ma in direzione dorsale e superiore, di conseguenza la superficie articolare dorsale della testa di M1 riceve un impingement con la base di P1 dell’alluce, limitando il range di dorsiflessione.

LA BIOMECCANICA DEL PIEDE NEL CICLO DEL PASSO

La funzione del piede non è solo statica, ma è principalmente dinamica; il ciclo del passo si suddivide in una fase di appoggio e una di oscillazione. La fase di appoggio che corrisponde circa al 60% del ciclo del passo, si divide in 3 fasi: fase di contatto del tallone o rocker di tallone ca 15%, fase di appoggio intermedio o rocker di caviglia 20%, fase di propulsione o rocker di avampiede 20%. Recentemente J. Perry (10) ha introdotto il 4° rocker o rocker dell’alluce, ca 5% della fase di appoggio.

1 rocker

Il piede e l’arto inferiore devono comportarsi come accomodatori/ammortizzatori, devono essere in grado di assorbire il picco di forze di reazione del terreno (GRF), e per far questo devono verificarsi delle condizioni. L’arto inferiore deve intraruotare, l’art. TT contatta in posizione neutra, ca 2-3° di plantarflessione, questo permette al piede di appoggiare e aiuta l’ammortizzazione delle forze insieme al ginocchio. L’art. TT plantarflette gradualmente, controllata dai muscoli della loggia anteriore, per permettere il contatto dell’avampiede al terreno. L’art. SA contatta il terreno in leggera supinazione per successivamente pronare e l’art. MDT deve invertire per permettere l’appoggio dell’avampiede da laterale a mediale. La pronazione dell’art. SA deve essere controllata, questo avviene grazie all’attivazione del Tibiale posteriore (TP), il muscolo soleo e infine il flessore lungo dell’alluce (FLA), insieme al flessore lungo delle dita (FLD) e ai gastrocnemi che decelerano l’intraruotazione di arto. L’art. MF1 dorsiflette di ca 25° per evitare di far inciampare con l’alluce grazie alla muscolatura pretibiale (EPA e ELD sono già attivi) e R1 è plantarflesso di ca 10°. Questa dorsiflessione di MF1 tensiona la fascia plantare, aumenta l’arco longitudinale, favorendo il contatto del piede con calcagno in inversione. Il piede in questo rocker si prepara a ricevere il peso corporeo e l’arco longitudinale mediale si abbassa, questo permette alla MF1 di plantarflettere e generare il meccanismo di Windlass inverso (attraverso attività eccentrica di TA e EPA).

2 rocker

Nel 2° rocker o rocker di caviglia il piede si trova in appoggio monopodalico, per assolvere la sua funzione di leva rigida stabilizzando l’avampiede al terreno, in modo tale da poter sostenere tutto il peso corporeo. La componente verticale della GRF diminuisce fino al 75% del peso del corpo, per aumentare nuovamente prima che il tallone si sollevi dal terreno. In questa fase l’arto extraruota,

l'art. TT deve dorsiflettere passivamente di 10° minimi di dorsiflessione passiva, fino a prepararsi al distacco del tallone che avviene circa al 35% della fase di appoggio; molto spesso il distacco del tallone è anticipato con conseguente aumento del tempo di 3 e 4° rocker. Durante questo rocker il muscolo soleo ha una funzione eccentrica, accumula energia. Nel mentre l'art. Sa dalla sua posizione di max pronazione deve supinare per riportarsi alla fine di questa fase in posizione neutra; il tendine d'Achille comincia a esercitare una tensione attraverso la contrazione attiva dei muscoli gastrocnemio e soleo, i quali decelerano il movimento anteriore d'inerzia della gamba ed inducono un rilevante momento di dorsiflessione sull'art. MDT (poiché la tensione del tendine d'Achille sul calcagno produce un forte momento di plantarflessione del retropiede che causa un aumento delle GRF sulla zona plantare dell'avampiede); questo meccanismo è probabilmente la più importante forza interna che produce un momento di dorsiflessione per l'art. MDT (fig.2).

Nello stesso momento la fascia plantare, i legamenti corti e lunghi plantari e lo spring ligament, producono un momento di plantarflessione dell'art. MDT, producendo un aumento dell'arco longitudinale che controbilancia i momenti di dorsiflessione, in associazione all'attivazione di muscoli TP, FLA, FLD, PL, muscoli plantari intrinseci che modulano la loro tensione in base alla richiesta. In questo modo l'art. MDT è in equilibrio sul piano sagittale e riesce a sostenere il peso corporeo, sostenuta anche dall'effetto travatura o "locking wedge" che permette attraverso le forze compressive di sostenere il carico, dal blocco calcaneo cuboideo e dal meccanismo ad argano inverso. Se l'art. MDT è stabile, allora anche l'avampiede potrà rimanere stabile al terreno; ogni singolo raggio metatarsale avrà un'adeguata stiffness che resisterà alle GRF mantenendo il contatto con il terreno su tutte le TMT.

La stabilizzazione delle ossa del meso-avampiede deve avvenire anche sul piano trasversale ed è data dal bilanciamento tra forza abduttoria del PL e la forza adduttoria del TP: questi muscoli esercitano una forza diretta posteriormente sulle loro inserzioni a livello del mediotarso, determinando una compressione sul piano sagittale che stabilizza posteriormente le ossa del mediotarso sia tra loro che contro l'astragalo e il calcagno, ed esercitano una forza sul piano trasversale stabilizzando il meso-avampiede assieme all'abducente dell'alluce, FBD, abducente 5° dito, quadrato della pianta. I muscoli intrinseci, durante la seconda metà della fase di appoggio intermedia, producono una forza di tensione necessaria a stabilizzare trasversalmente e posteriormente le ossa del metatarso e del mediotarso, che si stabilizzano reciprocamente.

Nel rocker di caviglia è fondamentale la stabilizzazione di R1, poiché è condizione necessaria per consentire un normale carico durante la propulsione prima della stabilizzazione dell'alluce. La stabilizzazione fisiologica di R1 richiede una posizione supinata del piede, una formula di index minus, affinché la base di M1 e del cuneiforme si possano spostare in un punto più alto rispetto al cuboide, tale da permettere al muscolo PL di esercitare un momento di plantarflessione per stabilizzare la base di R1 contro le GRF dirette sulla testa di M1.

In questa fase l'alluce è a contatto con il terreno, l'art. MF1 si trova in equilibrio rotazionale, poiché né accelera né decelera rispetto alla testa di M1. L'equilibrio rotazionale (11) consiste nell'equilibrio tra il momento interno di plantarflessione dell'alluce creato dalla forza di tensione della fascia plantare (windlass mechanism inverso) e da ogni altro muscolo che agisce sull'alluce plantarmente e il momento esterno di dorsiflessione causato dalle GRF sull'alluce. Le GRF agiscono verticalmente sotto ai sesamoidi che trasferiscono le GRF superiormente alla zona plantare della testa di M1; questo trasferimento di GRF agisce sull'alluce sulla parte plantare di P1 e P2 (falange intermedia). In questa fase l'art. MF1 passa dalla posizione neutra a una dorsiflessione di 21° al sollevamento del calcagno.

3 rocker

Durante il 3° rocker o rocker d'avampiede la gamba continua a extraruotare e ci si prepara al trasferimento del carico al piede controlaterale, la componente verticale della GRF raggiunge un picco massimo e il peso sostenuto dal piede si attesta intorno al 125% del peso corporeo. Tale picco è sostenuto solo dall'avampiede e dalle dita, poichè il tallone è sollevato dal suolo. Il peso del corpo viene inoltre spostato dalla parte laterale dell'avampiede al lato mediale; non appena il tallone si solleva, il peso è sostenuto completamente dalla testa di M5. Successivamente le teste dei metatarsali centrali (M2-M3) insieme al 1° dito sostengono la maggior parte del peso del corpo, spostandosi medialmente, grazie all'azione del PL e PB, e infine il peso viene trasferito nel piede controlaterale con il distacco finale delle dita. Quando la proiezione verticale del centro del corpo si trova sulle teste MT, il tallone si alza; in questa fase il profilo arrotondato delle teste MT funge da rocker dell'avampiede, lo stesso aspetto anatomico delle teste MT favorisce il rotolamento e consente alle MF di passare da una posizione quasi parallela al terreno a una posizione verticale. La progressione subisce un' accelerazione man mano che il peso del corpo cade oltre l'area di supporto del piede; questa è il momento in cui si sviluppa la maggior forza di propulsione durante il ciclo del passo. (fig.3) Al distacco del tallone si produce una brusca plantarflessione di TT di ca 20°, questo sblocco della caviglia, serve a trasferire l'energia che era stata accumulata concentricamente nel tricipite, per permettere all'arto di avanzare.

Al distacco del tallone l'avampiede deve essere stabile al terreno e per evitare l'allargamento del ventaglio metatarsale causato dalle forze verticali, di tensione e di taglio, deve attivarsi il capo trasverso dell'adduttore dell'alluce. In questo momento il piede deve trovarsi in una posizione di supinazione, in questo modo insieme al windlass mechanism passivo attivato dalla dorsiflessione passiva della 1°MF, viene favorita la stabilità dell'avampiede. Quindi è necessario che l'art. MF1 funzioni correttamente, infatti in fase propulsiva il metatarsale continua a plantarflettere spostando l'asse di rotazione della MF1 in senso dorsale e posteriore permettendo lo scivolamento della P1 sulla testa di M1 per raggiungere quei gradi di dorsiflessione necessari. L'alluce essendo l'ultimo dito a staccarsi dal terreno deve essere stabile non solo sul piano sagittale, ma anche sul piano trasversale, attraverso l'azione dell'adduttore e abducente dell'alluce.

Le dita minori durante la fase propulsiva sono attive e hanno il compito di creare una trave rigida per lo spostamento del peso corporeo al piede controlaterale insieme all'alluce. La funzione propulsiva delle dita minori (12) è data dal FLD che, oltre a plantarflettere l'art. TT in questa fase, stabilizza le dita minori sul rispettivo MT e sul suolo; tuttavia, per evitare un'eccessiva plantarflessione dell'art. interfalangea prossimale (IFP) e distale (IFD) e dorsiflessione di MF, occorre che le dita siano rigide, ovvero che sia avvenuta la stabilizzazione in estensione tramite lombricali e interossei e EBD. Contemporaneamente il FBD stabilizza la P2 su P1 e P1 sul rispettivo metatarsale e al suolo in sinergismo con FLD. I muscoli lombricali a livello dell'art. MF hanno delle adesioni sul retinacolo, per cui possono creare una forza in flessione plantare che tende a stabilizzare la P1 sul terreno. Successivamente il tendine prosegue e diventa dorsale e si inserisce sulla bandelletta, sulla capsula articolare e dorsalmente al centro di rotazione delle articolazioni IF, trasformando le dita in una trave rigida in grado di contrapporsi alle forze di reazione del terreno. I muscoli lombricali non sono sufficienti per creare un equilibrio, sono infatti necessari anche gli interossei che neutralizzano le forze di dorsiflessione che arrivano a seguito della contrazione dei muscoli flessori, e stabilizzano le MF sia sul piano sagittale, che sul piano trasversale come abbiamo visto in precedenza. I tendini dell'ELD nella fase di propulsione contribuiscono con la loro trazione ad irrigidire l'articolazione e mantengono l'effetto trave dei lombricali tramite l'irrigidimento delle articolazioni in sinergismo con interossei ed EBD. Tutti questi muscoli lavorano sinergicamente: alcuni con effetto di stabilizzazione, altri con effetto di propulsione.

Fase di oscillazione

Durante la fase di oscillazione il piede non sostiene il carico del corpo, ma deve verificarsi un'adeguata clearance, perciò la gamba continua a extraruotare, l'art. SA prona nella prima parte per

poi supinare e prepararsi al contatto in inversione; l'art. TT nella prima parte continua a plantarflettere ma abbastanza velocemente inizia a dorsiflettere per mantenere un adeguata distanza del piede dal terreno durante l'avanzamento ed evitare che inciampi. Durante questa fase l'art. MF1 dorsiflette sempre per azione del TA e dei mm. pretibiali per staccare le dita dal terreno, questo produce un'inclinazione di M1 che tensiona la fascia plantare, elevando l'arco e generando il meccanismo di windlass attivo.

CONCLUSIONI

Quando affrontiamo la clinica quotidianamente e ci troviamo di fronte a dei traumi al piede e alla caviglia, inevitabilmente dopo aver risolto la fase acuta in prima istanza, ci ritroviamo a dover affrontare la patomeccanica che quel trauma ha creato. L'intervento clinico deve mirare a una restitutio ad integrum non solo anatomica ma anche funzionale, e laddove non possibile occorre tenere in considerazione le alterazioni biomeccaniche più facili da compensare successivamente. Conoscere la biomeccanica fisiologica è fondamentale per chi approccia alla patologia di piede e caviglia.

BIBLIOGRAFIA

1. McCormick P.C., Stein B.M. Functional anatomy of the spinal cord and related structures. Neurosurgery Clinics of North America, 1990, pp. 469-489.
2. Albert S.F., Curran S.A. Lower Extremity Biomechanics. Denver : Bipedmed, 2013. Vol. 1.
3. Silfverskiöld N., Reduction of the uncrossed two joint muscle of the leg too one joint muscle in spastic conditions. Acta Chir.Scand. : Acta Chir.Scand., 1924.
4. Hintermann B., Total ankle arthroplasty. s.l. : Springer WienNewYork, 2005.
5. Root M. L., Orien W. P. and Weed J. H. La funzionalità del piede normale e patologico. s.l. : Ed. Piccin, 2001. Vol. 2.
6. KA, Kirby. Foot and Lower Extremity Biomechanics III: Precision Intricast Newsletters. s.l. : Precision Intricast, 2009-2013. pp. 39-50.
7. EA, Fuller. Center of pressure and its theoretical relationship to foot pathology. JAPMA, 1999 (6), Vol. 89, pp. 278-291.
8. Kirby KA, Roukis TS. Precise naming aids dorsiflexion stiffness diagnosis. Bioemchanics, 2005, Vol. July, pp. 55-63.
9. Roukis TS, et al., Position of the first ray and motion of the first metatarsophalangeal joint. J Am Podiatr Med Assoc. , 11, Nov 1996, Vol. 86, pp. 538-46.
10. J.Perry. Gait analysis, Normal and Pathological function. s.l. : Slack Incorporated, second edition, , 2010.
11. KA, Kirby. Foot and Lower Extremity Biomechanics III: Precision Intricast Newsletters. s.l. : Precision Intricast Inc., 2014-2018.
12. E.D., McGlamry. Lesser ray deformities, Comprehensive textbook of foot surgery,. Baltimore : ed. Williams & Wilkins Baltimore, 1992. pp. 321-378.