

Arto inferiore – Parte II

Piede: biomeccanica vettoriale, archi plantari e adattamenti sistemici

Dott. Mauro Lastrico – dott.ssa Laura Manni

Nota editoriale (apertura Parte II)

Nota editoriale

Questo articolo costituisce la **Parte II** del capitolo dedicato alla biomeccanica dell'arto inferiore. La lettura di questo contenuto presuppone la conoscenza dei principi sviluppati nella Parte I, dedicata all'anca e al ginocchio, con cui il piede intrattiene relazioni biomeccaniche bidirezionali.

3 Piede

Relativamente al piede verranno prese in esame le risultanti vettoriali sull'articolazione tibio-tarsica, sull'arco mediale plantare, sull'arco anteriore plantare e sull'alluce.

3.1 Articolazione Tibio-Tarsica

La dominanza vettoriale sull'articolazione tibio-tarsica, sia per numero di muscoli agenti che per forza lavoro e potenza esprimibile, è in direzione della flessione plantare e supinazione.

Dominanze Flesso-Estensorie

| Flessione dorsale muscoli: | Flessione plantare muscoli: | Dominanza vettoriale: |
|---------------------------------------|--|------------------------------|
| Tibiale anteriore | Tricipite surale | Flessione plantare |
| Estensore lungo delle dita | Peroniero lungo | |
| Estensore lungo dell'alluce | Peroniero breve | |
| | Flessore lungo delle dita | |
| | Tibiale posteriore | |

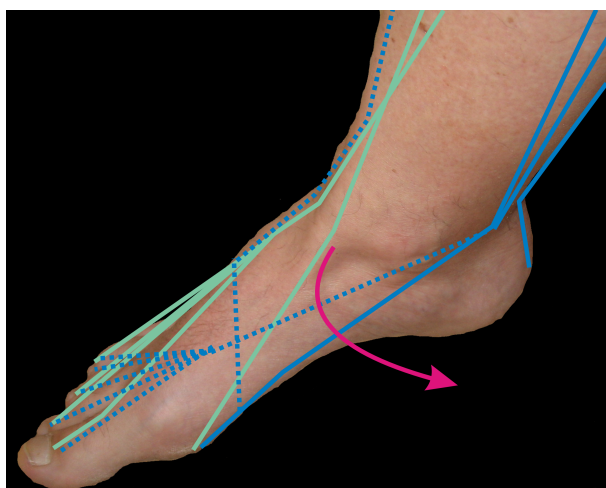


Figura 22: Dominanze flessore-estensorie

- *Flessori dorsali tibio-tarsica: tibiale anteriore, estensore lungo delle dita e dell'alluce (verde)*
- *Flessori plantari tibio-tarsica: tricipite surale, tibiale posteriore, peroniero lungo e breve, flessore lungo delle dita (blu)*

La dominanza vettoriale è a favore della flessione plantare

Dominanze Prono-Supinatorie

| Supinazione muscoli: | Pronazione muscoli: | Dominanza vettoriale: |
|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Tricipite surale | Peroniero lungo | Supinazione |
| Tibiale posteriore | Peroniero breve | |
| Flessore lungo dell'alluce | Estensore lungo delle dita | |
| Flessore lungo delle dita | Peroniero terzo | |
| Tibiale anteriore | | |

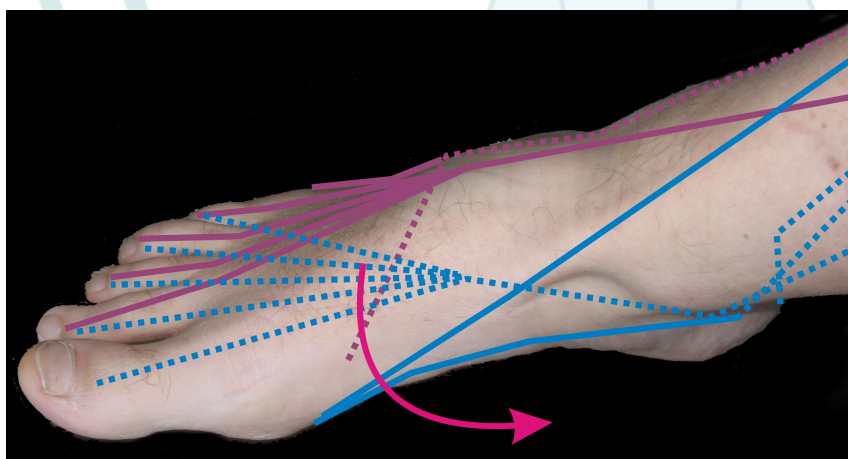


Figura 23: Dominanze prono-supinatorie

- *Pronazione tibio-tarsica: peroniero breve e lungo, estensore comune delle dita (viola)*
- *Supinazione tibio-tarsica: tricipite surale, tibiale anteriore, tibiale posteriore, flessore lungo delle dita e dell'alluce (blu)*
- *La dominanza vettoriale è a favore della supinazione*

3.2 Strategie Adattive dell'Articolazione Tibio-Tarsica

Nel caso in cui i muscoli agenti sull'articolazione tibio-tarsica entrino in eccesso di tensione e in successivo accorciamento, le dominanze vettoriali in supinazione e flessione plantare sono tali da non poter essere bilanciate dai diretti antagonisti.

In questo caso, per poter appoggiare la pianta del piede al suolo in stazione eretta, il sistema dovrà utilizzare strategie adattive modificando la sequenza articolare femoro-tibio-peroneale.

In presenza di accorciamento dei flessori plantari e dei supinatori, l'appoggio al suolo della pianta del piede diventerà possibile, fondamentalmente, attraverso l'iperestensione in rotazione interna del ginocchio.



Fig.1

Fig.2

Figura 24: Strategia adattiva

- *L'accorciamento dei flessori plantari e supinatori del piede non può essere bilanciato dagli antagonisti diretti (fig.1)*
- *L'appoggio al suolo della pianta del piede (fig.2) può avvenire attraverso l'iperestensione in rotazione interna del ginocchio*

3.3 Arco Mediale Plantare

I muscoli che sono in grado di modificare l'arco mediale plantare sono suddivisi in tre gruppi:

Muscoli anteriori della gamba: Tibiale anteriore, Estensore lungo delle dita, Peroniero lungo.

Muscoli posteriori della gamba: Tricipite surale, Tibiale posteriore, Flessore lungo dell'alluce, Flessore lungo delle dita.

Muscoli della pianta del piede: Abduttore dell'alluce, Flessore breve dell'alluce, Adduttore dell'alluce, Quadrato della pianta.

Azione specifica dei muscoli sull' arco mediale

| muscolo | Azione in accorciamento | Effetto sull'arco mediale | Effetto sul ginocchio |
|---|---|--|-----------------------|
| Tibiale anteriore | Supinazione | Maggior cavismo | Varismo |
| Estensore lungo delle dita | I tendini passano sotto i retinacoli dei muscoli estensori. Prendendo punto fisso a questo livello il muscolo può determinare la sublussazione dei cuneiformi | Maggior cavismo | |
| Peroniero lungo | Il tendine si inserisce al 1° osso metatarsale e all'osso cuneiforme mediale. Con questo percorso sembra essere la corda di un arco (Kummer) che, se si accorcia, mentre prona la tibio-tarsica aumenta e stabilizza la volta plantare | Maggior cavismo | Varismo |
| Peroniero breve | Inserendosi sul V osso metatarsale è un pronatore della tibiotarsica ma non ha alcun effetto diretto od indiretto sull'arco mediale | Nessun effetto | Varismo |
| Tricipite surale | Forte supinatore del calcagno | Maggior cavismo come risultante meccanica della supinazione del calcagno | Valgismo |
| Tibiale posteriore | Supinazione | Maggior cavismo | Valgismo |
| Flessore lungo dell'alluce Flessore lungo delle dita | Oltre a flettere plantarmente l'alluce e le dita, flettono plantarmente il piede e lo supinano | Maggior cavismo | |

| | | | |
|--|--|-----------------|--|
| Abduttore dell'alluce | È il principale muscolo dell'eminanza plantare mediale. Agisce come la corda di un arco tesa tra calcagno ed alluce che, accorciandosi, aumenta l'arco mediale | Maggior cavismo | |
| Flessore breve dell'alluce Adduttore dell'alluce Quadrato della pianta | Seppure più brevi, relativamente all'arco mediale, agiscono come l'abduktore dell'alluce | Maggior cavismo | |

3.4 Particolarità Biomeccanica dell'Arco Mediale

Come evidenziato, i muscoli agenti sull'arco mediale plantare agiscono tutti nel senso del suo sostegno.

In tutte le articolazioni analizzate, seppur in squilibrio vettoriale, le forze agenti sono in antagonismo tra loro.

L'arco mediale presenta la particolarità di avere tutti i vettori muscolari in sommatoria di azione.

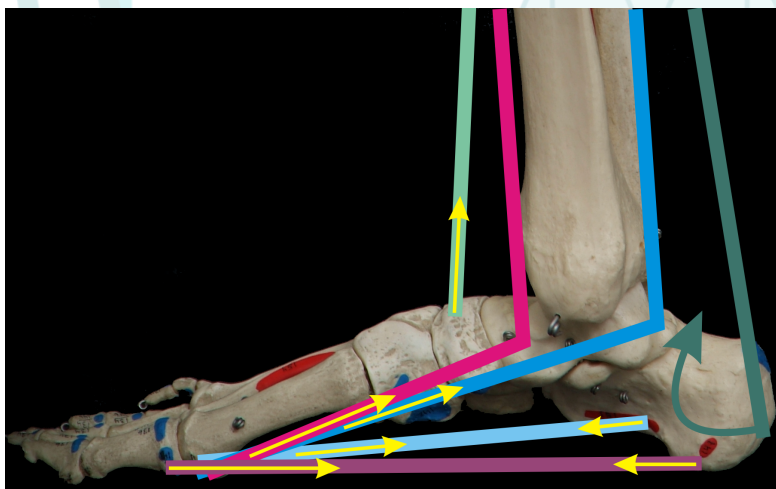


Figura 25: Vettori di sostegno dell'arco mediale

- *Abduktore dell'alluce: viola*
- *Quadrato della pianta: azzurro*
- *Tricipite surale: verde scuro*
- *Tibiale posteriore, flessore lungo dell'alluce e delle dita: blu*

- *Tibiale anteriore: magenta*
- *Estensore lungo delle dita: verde chiaro*
- *Le frecce indicano le linee di forza tutte orientate al sostegno dell'arco mediale*

Principio Ingegneristico dell'Arco Mediale

Da un punto di vista "ingegneristico" la cosa non sorprende: essendo l'arco mediale deputato a sostenere l'intero peso corporeo (in stazione eretta il baricentro corporeo si scarica all'apice dell'arco mediale) è comprensibile che tutti i "tiranti" agiscano da supporto ai legamenti e alla conformazione ad arco delle ossa.

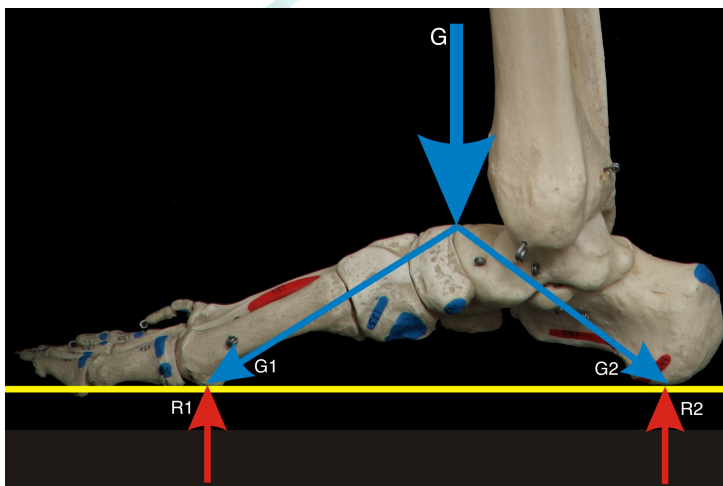


Figura 26: Distribuzione delle forze sull'arco mediale

- *Se l'allineamento scheletrico rispetta la sequenza fisiologica, la forza complessiva corporea G è applicata all'apice dell'arco mediale*
- *Da qui si divide tridimensionalmente scaricandosi al bordo laterale del piede, all'arco anteriore e al calcagno dove incontra le forze, uguali e contrarie R , espresse dal solido di appoggio*
- *Le forze $G1$ e $G2$, e $R1$ e $R2$, se non bilanciate dalle forze muscolo-legamentose agenti sull'arco plantare, farebbero "sdraiare" l'arco*

Principio Architettonico dell'Arco

Architettonicamente l'arco è in grado di sostenere grandi carichi verticali purché le basi siano stabili, in caso contrario l'arco cede.

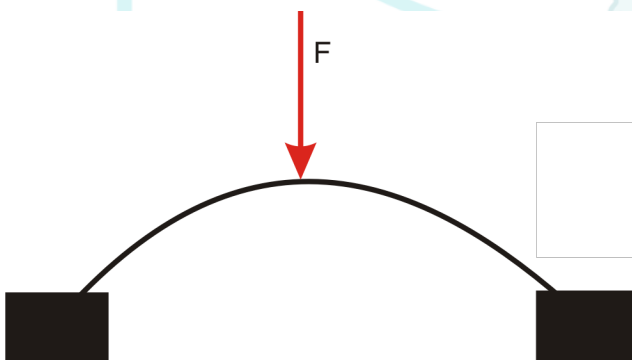


Figura 27: Stabilità dell'arco con basi bloccate

- *Se le basi sono bloccate, la struttura ad arco è in grado di sostenere grandi carichi verticali come i piloni nei ponti romani o le colonne nelle volte delle chiese*
- *Nella volta plantare le basi rigide sono sostituite da tiranti in grado di meglio sopportare le sollecitazioni dinamiche (come nei ponti moderni)*

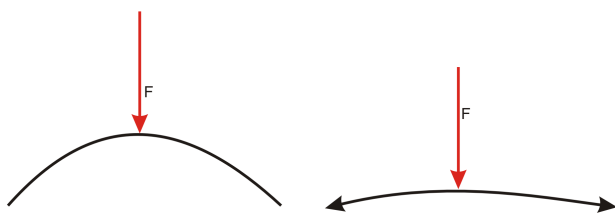


Figura 28: Cedimento dell'arco con basi non sostenute

Se le basi non sono sostenute, la forza del carico verticale farà "sdraiare" l'arco

L'azione muscolare è quindi mirata al sostegno delle basi.

Inoltre, non essendo l'arco mediale plantare costituito da un unico osso, cosa che lo renderebbe stabile ma rigido e inadeguato alle sollecitazioni dinamiche, assume ulteriore importanza la tensione muscolo-legamentosa che, se espressa al minimo necessario, stabilizza dinamicamente la volta plantare.

3.5 Piede Piatto

Poiché l'azione di tutti i muscoli agenti è indirizzata al sostegno dell'arco mediale, in assenza di patologie specifiche, il cedimento della volta plantare dev'essere determinato da una deformazione strutturale ossea di rilevante entità, tale da impedire ai "tiranti" muscolari di formare l'arco.

Quando invece è presente paralisi neurologica periferica con conseguente inattività muscolare o altro quadro patologico specifico, il cedimento ha ovviamente altra origine.

Sarà quindi necessario diversificare, in presenza di un'impronta piatta, se quest'ultima è causata da vero piattismo (con cedimento della volta plantare) o da ipertrofia dei muscoli della volta plantare, ed espressione di meccanismo adattivo di altre problematiche.



Figura 29 e 30: Piedi con impronta piatta

Valutazione Differenziale del Piede Piatto

Prima indagine manuale: La prima indagine sarà manuale e mirata a percepire la posizione dell'arco:

- **In caso di reale cedimento della volta:** astragalo, navicolare e cuneiformi appariranno in posizione orizzontalizzata.

- **In caso contrario:** l'arco osseo apparirà integro e la palpazione metterà in evidenza l'ipertrofia dei muscoli plantari.



Figura 31: Indagine palpatoria

Con l'indagine palpatoria, è possibile percepire l'andamento osseo dell'arco, distinguendolo da un'eventuale presenza di ipertrofia muscolare

Meccanismo Adattivo del Piede Piatto

Nel caso in cui l'arco risulti integro, e l'impronta piatta sia espressione dell'ipertrofia muscolare, si procederà analizzando eventuali meccanismi adattivi.

Esempio clinico: In stazione eretta (sempre nel paziente precedente) si evidenzia un'importante rotazione interna dei femori.

Chiedendo la correzione attiva dell'intrarotazione femorale, i piedi, e in particolare il destro, mettono in evidenza un ipercavismo.

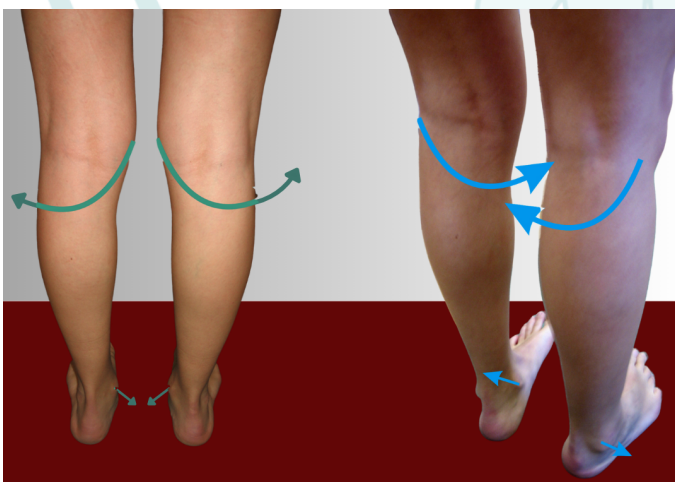


Figura 32: Test di derotazione femorale

- *Foto a sinistra: oltre all'impronta piatta, è riscontrabile un'importante intrarotazione femorale*
- *Foto a destra: derotando, attivamente o passivamente, il femore, il carico grava sul bordo esterno dei piedi mostrando un eccesso di cavismo*

Meccanismo Compensatorio

In questo caso si assiste a un meccanismo di tipo adattivo: con i femori correttamente posizionati, i piedi mostrano un eccesso di cavismo, con appoggio sul bordo laterale per la tensione dei supinatori e dei muscoli propri della pianta del piede.

I muscoli pronatori della tibio-tarsica, essendo vettorialmente sottodominanti rispetto ai supinatori, non possono bilanciarli e permettere l'appoggio fisiologico della pianta del piede al suolo.

Inoltre, il maggior pronatore, il peroniero lungo, contribuisce anch'esso all'eccesso di cavismo.

Per permettere al piede un appoggio più funzionale, quindi, a vicariare l'azione dei pronatori intervengono gli intrarotatori femorali e il calcagno mostrerà un valgismo non primario, conseguenza dell'intrarotazione dell'arto inferiore.

Implicazioni Cliniche

In questo caso, quindi, l'apparente piede piatto è causato da un piede cavo compensato a monte attraverso la rotazione femorale e tibiale, con l'impiego di muscoli non agenti direttamente sul piede.

E' attraverso lo studio lineare dei vettori muscolari che è possibile analizzare se il bilanciamento articolare può essere assicurato da muscoli antagonisti agenti sull'articolazione o se, come nel caso dell'apparente piede piatto, tale bilanciamento avviene attraverso l'impiego di muscoli agenti altrove.

In situazioni di questo tipo, la correzione dell'apparente piattismo con mezzi esterni potrebbe determinare compensi in aggravamento in altri distretti corporei.

Tale applicazione, quindi, dovrà essere valutata non solo nel distretto scheletrico di applicazione, ma sull'intero sistema corporeo.

3.6 Arco Anteriore Plantare

Sull'arco anteriore le dominanze vettoriali si esprimono in modo diverso rispetto all'arco mediale.

Sostegno dell'Arco Anteriore

Le basi dell'arco (I° e V° metatarso), oltre che dai legamenti, sono sostenute solo dal capo obliquo del muscolo adduttore dell'alluce.

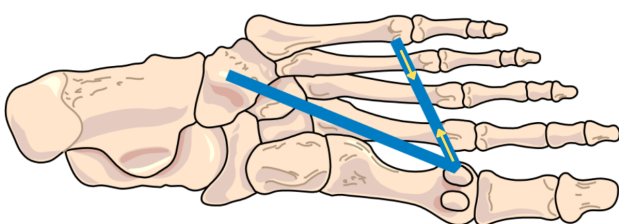


Figura 33: Sostegno dell'arco anteriore

La porzione obliqua dell'adduttore dell'alluce (blu) è l'unico "tirante" a sostegno delle basi (I e V metatarso) dell'arco anteriore del piede (frecce gialle)

Azione dei Muscoli sulle Dita

Tutti gli altri muscoli agiscono sulle dita:

- **Estensore lungo e breve delle dita:** flettono dorsalmente le dita.
- **Estensore lungo e breve dell'alluce:** flettono dorsalmente l'alluce.
- **Lombricali e interossei:** flettono dorsalmente la prima falange e plantarmente la seconda e terzi, adducono o abducono i metatarsi i secondi.
- **Flessore lungo delle dita:** flette plantarmente l'ultima falange.
- **Flessore breve:** flette plantarmente la seconda falange.

La retrazione di questi muscoli determina una dominanza vettoriale in flessione dorsale della prima falange e in flessione plantare della seconda e della terza.



Figura 34: Azione sui muscoli delle dita

L'accorciamento dei muscoli agenti sulle dita determina una risultante complessiva in flessione dorsale della prima falange e in flessione plantare della seconda e della terza

Meccanismo di Cedimento dell'Arco Anteriore

La flessione dorsale della prima falange delle dita determina una spinta meccanica sui metatarsi proiettandoli verso il terreno.

A questa spinta concorre, sotto carico, la porzione della forza complessiva G che si scarica sull'arco anteriore.

In questo caso, la forza che sostiene le basi dell'arco, la porzione trasversa dell'adduttore dell'alluce, risulta sottodominante.

Primo e quinto metatarso si allontanano e l'arco anteriore si spiana.

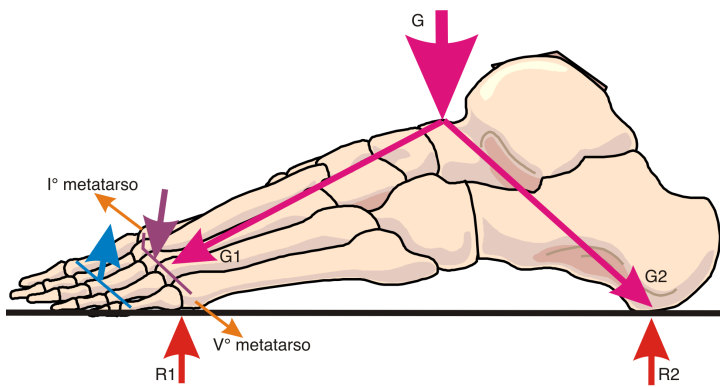


Figura 35: Cedimento dell'arco anteriore

- La flessione dorsale delle prime falangi (freccia blu) determina l'infossamento dei metatarsi (freccia porpora) e il conseguente allontanamento del primo e del quinto metatarso (freccie arancioni)
- La porzione trasversa dell'adduttore dell'alluce risulta sottodominante nel bilanciare le spinte meccaniche e l'arco cede
- Cedimento dell'arco a cui concorrono le forze G1 e R1

3.7 Alluce

La stabilità latero-laterale dell'alluce è sotto il controllo dei muscoli adduttore e abduttore dell'alluce, estensore lungo e breve dell'alluce e flessore lungo e breve dell'alluce.

Azioni Specifiche sui Muscoli dell'Alluce

Considerando come riferimento l'asse del piede, esteso da centro del tallone al secondo dito:

- **Estensore lungo e flessore lungo dell'alluce:** adducono la falange distale dell'alluce.
- **Estensore breve e abduttore dell'alluce:** abducono il primo metatarso e la prima falange dell'alluce.
- **Adduttore e flessore breve dell'alluce:** adducono il primo metatarso e la prima falange dell'alluce.

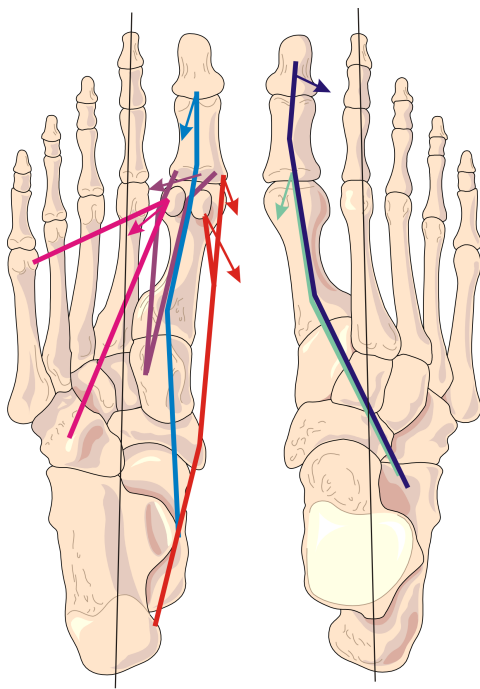


Figura 36: Muscoli dell'alluce

- *A sinistra, visione plantare:*
 - *Abduttore dell'alluce: rosso*
 - *Adduttore dell'alluce: magenta*
 - *Flessore breve dell'alluce: viola*
 - *Flessore lungo dell'alluce: blu*
- *A destra, visione dorsale:*
 - *Estensore lungo dell'alluce: blu scuro*
 - *Estensore breve dell'alluce: verde*

Meccanismo dell'Alluce Valgo

L'accorciamento sistemico di questi muscoli determina una risultante e una dominanza vettoriale che si esprime con l'abduzione del primo metatarso e con l'adduzione della falange distale dell'alluce (alluce valgo).

Il cedimento dell'arco anteriore plantare, determinando l'abduzione, rispetto al secondo dito, del primo e del quinto metatarso, accentua la deviazione angolare dell'alluce. I due quadri si presentano spesso in associazione.

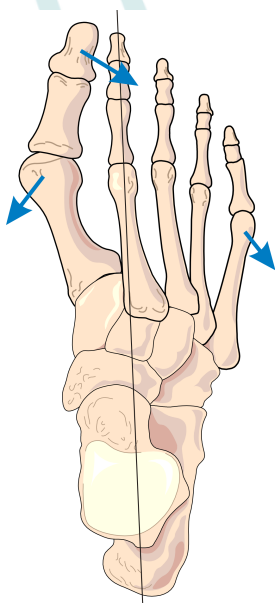


Figura 37: Alluce valgo

- *Considerando l'asse centro del tallone-secondo dito, l'accorciamento dei muscoli agenti sull'alluce hanno una risultante complessiva che determina l'abduzione del primo metatarso e l'adduzione della falange distale*
- *Poiché alluce valgo e appiattimento dell'arco anteriore plantare si presentano spesso come quadri associati, oltre all'abduzione del primo sarà presente anche l'abduzione del quinto metatarso*

Valutazione delle Cause Primarie

In sede valutativa sarà importante anche determinare se il quadro associato, valgismo alluce/cedimento dell'arco anteriore, è determinato primariamente dall'accorciamento selettivo dei muscoli agenti in questi distretti o è conseguenza dell'anteriorizzazione della forza complessiva G applicata al baricentro corporeo.

Tale forza, al contrario di quanto avviene all'arco mediale, è contrastata dal solo adduttore dell'alluce nella sua porzione trasversa.

Il potenziale esprimibile dall'adduttore dell'alluce è insufficiente a contrastare la forza dell'intero peso corporeo e conseguentemente i metatarsi, dal secondo al quarto, in casi estremi potrebbero entrare a contatto con il suolo.

Una volta che l'arco è appiattito, la forza complessiva G si distribuisce a tutte le teste metatarsali dove viene bilanciata dalla forza R a sua volta distribuita su tutte le teste metatarsali.

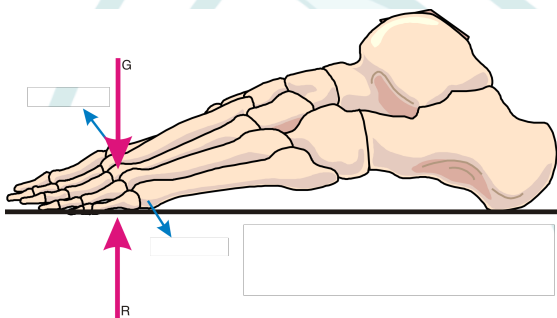


Figura 38: Anteriorizzazione del baricentro

Il cedimento dell'arco anteriore plantare può essere indotto, meccanicamente, dall'anteriorizzazione della forza complessiva G applicata al baricentro corporeo

Nota sulla reversibilità degli accorciamenti

Come per tutti i distretti analizzati, gli accorciamenti muscolari descritti nell'arto inferiore sono potenzialmente reversibili attraverso appropriate tecniche terapeutiche che agiscono sui meccanismi di rimodellamento tissutale e ricalibrazione propriocettiva.

L'identificazione corretta delle cause primarie, siano esse prossimali o distali, orienta l'intervento verso la risoluzione stabile delle alterazioni.

Conclusioni

L'analisi dell'arto inferiore evidenzia una gerarchia di complessità che va dalla sofisticata biomeccanica dell'anca, attraverso il coinvolgimento dell'articolazione del ginocchio, fino alle specifiche adattive del piede.

Particolarmente significativa è la constatazione che nell'arco mediale plantare tutti i vettori muscolari agiscono in sommatoria di azione in favore del sostegno, diversamente da ogni altra articolazione corporea dove esistono antagonismi. Questo principio ingegneristico riflette la necessità di sostenere l'intero peso corporeo.

La comprensione dei meccanismi adattivi, come quello del "piede piatto compensato" attraverso rotazioni femorali, dimostra l'importanza di una valutazione sistemica, che consideri le interconnessioni tra tutti i distretti dell'arto inferiore, mentre l'applicazione dei principi vettoriali conferma che le alterazioni osservate seguono precise leggi fisiche.

Le dominanze muscolari determinano configurazioni scheletriche prevedibili: dal meccanismo di inversione funzionale dei flessori del ginocchio in carico, all'unicità dell'arco mediale dove tutti i vettori convergono in sommatoria, fino ai meccanismi adattativi che utilizzano muscoli distanti per compensare squilibri locali.

Questi principi dimostrano che anche nell'arto inferiore, sottoposto ai carichi della stazione eretta e della deambulazione, sono i muscoli accorciati a determinare le alterazioni scheletriche, attraverso meccanismi fisicamente dimostrabili e potenzialmente reversibili con appropriato trattamento delle cause primarie.

Concetti chiave del capitolo

Muscoli mono-articolari dell'anca come legamenti attivi I muscoli mono-articolari e con breve linea di forza agiscono principalmente per la stabilizzazione articolare, comportandosi come legamenti dinamici capaci di adattarsi alle sollecitazioni endo-articolari della coxo-femorale.

Alterazioni del ginocchio con ripercussioni obbligate sull'anca Valgismo, varismo, iperestensione e flessione del ginocchio modificano necessariamente la distribuzione delle forze nell'acetabolo, creando compressioni localizzate e potenziali conflitti meccanici all'articolazione coxo-femorale.

Sindrome del piriforme: doppio meccanismo Può manifestarsi sia per intrarotazione-abduzione femorale (piriforme in tensione per contenimento) sia per varismo di ginocchio (piriforme in accorciamento per mantenere efficacia). In entrambi i casi la possibile conseguenza potrebbe essere la compressione del nervo sciatico.

Progressione dei quadri di alterazione dell'asse del ginocchio Sequenza di aggravamento: intrarotazione-iperestensione → flessione-extrarotazione. Un ginocchio apparentemente in buona posizione potrebbe aver esaurito le prime due direzioni sfociando nelle successive.

Arco mediale: tutti i vettori in sommatoria (in assenza di patologie specifiche) Unica articolazione dove tutti i muscoli agiscono per il sostegno, senza antagonismo. Principio ingegneristico per sostenere l'intero peso corporeo all'apice dell'arco.

Piede piatto apparente come meccanismo adattivo Può essere espressione di piede cavo compensato attraverso intrarotazione femoro-tibiale. I muscoli non agenti sul piede vicariano l'azione dei pronatori insufficienti.

Arco anteriore: cedimento per dominanza flessoria delle dita La flessione dorsale della prima falange determina una spinta sui metatarsi. L'adduttore dell'alluce (unico sostegno trasverso) risulta insufficiente a bilanciarne la dominanza.

Alluce valgo: è il risultato delle dominanze muscolari.

