UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

VALUTAZIONE DELL'INFLUENZA DELL'UTILIZZO DI PLANTARI PER DIFFERENTI CONFORMAZIONI DEL PIEDE

Relatore: Ch.mo Prof. ARTURO N. NATALI

Correlatore: Ing. ANTONELLA FORESTIERO

Laureanda: MARICA PESCE

Corso di laurea triennale in Ingegneria Biomedica

Anno Accademico 2010/2011

Indice

INDICE **1**

INTRODUZIONE **3**

CAPITOLO 1

CARATTERIZZAZIONE ANATOMICA E MORFOMETRICA DEL PIEDE **5**

1.1.Introduzione 5

1.2.Componenti scheletriche 6

1.3.Componenti legamentose 15

1.4.Componenti muscolari e tendinee 20

1.5.Componenti adipose 26

CAPITOLO 2

CARATTERIZZAZIONE DI DIFFERENTI CONFORMAZIONI DEL PIEDE **27**

2.1.Introduzione 27

2.2. Il piede piatto 27

2.3.Il piede cavo 30

2.4.Movimenti di pronazione e supinazione 31

2.5.Descrizione del gruppo di soggetti considerato 33

CAPITOLO 3

DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA E DELLE PROVE SPERIMENTALI ESEGUITE **35**

3.1.Introduzione 35

3.2.Descrizione del setup sperimentale 36

3.2.1. La pedana baropodometrica 36

3.2.2.Il podoscopio 43

2.3.Modalità di esecuzione della procedura 44

CAPITOLO 4

CARATTERIZZAZIONE DEI PLANTARI UTILIZZATI NEL GRUPPO DI SOGGETTI CONSIDERATO ED EFFETTI RISCONTRATI IN CONDIZIONE STATICA 55

4.1.Introduzione 55

4.2.Il plantare 55

4.2.1. Il plantare preconfezionato 56

4.2.2. Il plantare su misura 57

4.3.Valutazione dell'influenza del plantare in condizioni statiche 60

CAPITOLO 5

INFLUENZA DEL PLANTARE SULL'ANDAMENTO DEL CENTRO DI PRESSIONE DURANTE IL PASSO 69

5.1.Introduzione 69

5.2.Descrizione del passo e delle sue fasi 69

5.3.Il centro di pressione CoP 76

5.3.1. L'andamento del CoP durante il passo 77

5.4.Influenza del plantare sull'andamento del CoP durante il passo 79

CONCLUSIONE 89

RINGRAZIAMENTI 91

BIBLIOGRAFIA 93

Introduzione

Si stima che una persona possa eseguire in media migliaia di passi in un solo giorno. Ogni passo, benché unico e diverso da tutti i precedenti, presenta durante il cammino alcune caratteristiche che si ripetono in modo significativo. Sono proprio queste particolarità del passo che hanno la necessità di essere indagate con metodi strumentali per poter risalire alle cause che alterano la corretta deambulazione. Generalmente ci si trova davanti a problemi di tipo posturale o di tipo strutturale che vanno affrontati molto spesso con l'uso di plantari ortopedici. L'obiettivo di questo lavoro è quello di fornire una modalità di valutazione dell'effetto dell'utilizzo del plantare prescritto dal medico in un gruppo di soggetti con diverse conformazioni del piede.

Si partirà innanzitutto dalla descrizione della morfometria del piede prendendo in considerazione le molteplici componenti ossee, muscolari, tendinee, legamentose, articolari e le componenti di tessuto adiposo; a partire da questa panoramica sulla complessa struttura del piede sarà possibile affrontare i caratteri principali delle conformazioni maggiormente riscontrate nel seguente studio: quella del piede piatto e quella del piede cavo. A partire dal terzo capitolo verrà presentata la procedura adottata per il rilevamento dei dati ed il setup sperimentale in essa utilizzato; l'attenzione verrà focalizzata in particolare sulla descrizione della pedana baropodometrica grazie alla quale si è potuta effettuare un'analisi della postura in condizione statica e della deambulazione durante il ciclo di un passo.

L'elaborazione dei dati raccolti dalle prove sperimentali permetterà di determinare i parametri più significativi per la valutazione dell'effetto dei plantari; il quarto capito, in particolare, sarà incentrato sullo studio stabilometrico e sul parametro del fattore di forma per la valutazione in condizione statica, mentre la valutazione durante lo svolgimento del passo verrà effettuata nel quinto capitolo. Dall'analisi dinamica si è scelto di considerare l'andamento del centro pressorio come parametro rappresentativo dell'intero passo poiché ad ogni sua minima variazione corrisponde un determinato significato; in particolare si è scelto di analizzare l'andamento del centro pressorio per un piede piatto e per un piede cavo. Di rilevante importanza per la valutazione

dell'effetto prodotto dall'utilizzo di un plantare, sarà il confronto che si effettuerà tra gli andamenti dei centri pressori determinati da un passo effettuato con piede scalzo e da un passo effettuato indossando il plantare prescritto. In seguito si illustrerà il metodo elaborato per quantificare le variazioni riscontrate; di particolare importanza saranno i valori che indicano il discostamento degli andamenti in corrispondenza delle varie fasi del passo per poter valutare l'effetto dell'utilizzo del plantare e trarre le conclusioni dello studio svolto.

CAPITOLO 1

Caratterizzazione anatomica e morfometrica del piede

1.1. Introduzione

Il piede è una delle strutture anatomiche più importanti e complesse del corpo umano; è fondamentale durante la deambulazione e nel mantenimento dell'equilibrio e della postura. Per ogni movimento il piede subisce carichi e tensioni diverse che si riflettono su legamenti, tendini ed articolazioni. Per comprendere il comportamento meccanico che regola il funzionamento del piede, perciò, è necessario analizzare le varie parti che lo compongono.

Il piede è situato all'estremità dell'arto inferiore, funzionalmente e strutturalmente, è possibile suddividerlo in tre aree: retropiede formato da astragalo e calcagno, mesopiede formato da scafoide, cuboide e tre cuneiformi e l' avampiede formato dalle ossa metatarsali e dalle falangi. Nella posizione ortostatica, il piede permette di distinguere una superficie inferiore detta pianta o superficie plantare del piede ed una superficie superiore detta dorso del piede.

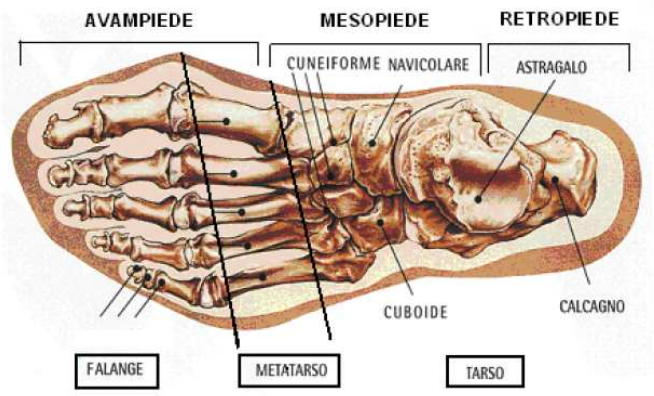


Fig. 1.1. Componenti ossee del piede e divisione avampiede, mesopiede, retropiede.

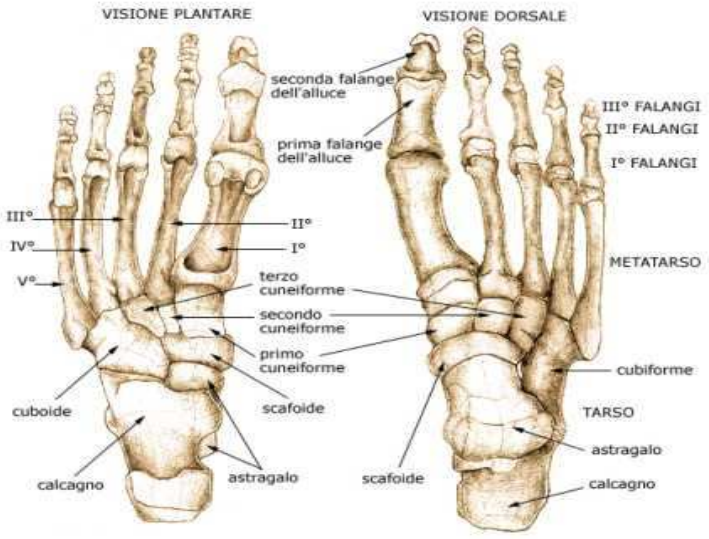


Fig. 1.2. Visione plantare e dorsale del piede.

1.2. Componenti scheletriche

La struttura scheletrica del piede è costituito dall'articolazione di ventisei ossa suddivise in tre sezioni: tarso, metatarso e falangi.

Il tarso

Il tarso è costituito dalle sette ossa che si trovano nella parte posteriore del piede tra la tibia ed il perone da un lato e i metatarsi dell'altro. Il tarso ha forma simile a una volta concava verso il basso; su di esso si scarica tutto il peso del corpo in posizione eretta.
E' composto da sette ossa brevi: posteriormente l'astragalo e il calcagno; medialmente lo scafoide (o navicolare), poi il cuboide e anteriormente i tre cuneiformi.

L'**astragalo** (o **talus**) è un osso irregolarmente cubico compreso tra le ossa della gamba in alto, il calcagno in basso e lo scafoide in avanti. Questo è il solo osso del piede privo di inserzioni muscolari ed è quindi mantenuto in posizione solo da legamenti e tendini. E' costituito da una parte principale, il corpo, che si prolunga in avanti nel collo, il quale si rigonfia nella testa. Quest'ultima di forma irregolarmente sferoidale presenta una faccia articolare per lo scafoide (faccia anteriore). Il corpo presenta nella parte superiore

una superficie articolare chiamata troclea che si articola con la tibia (faccia superiore), nella parte inferiore tre facce articolari calcaneari distinte in anteriore, media e posteriore per l'articolazione con il calcagno (faccia inferiore), nella parte posteriore l'estremo posteriore della troclea, al di sotto del quale si ha un solco sagittale delimitato dai tubercoli laterale e mediale, destinato al passaggio del tendine del muscolo flessore lungo dell'alluce (faccia posteriore). La troclea si estende lateralmente e medialmente formando faccette articolari (faccia laterale e mediale) disposte su un piano sagittale per le facce dei due malleoli.

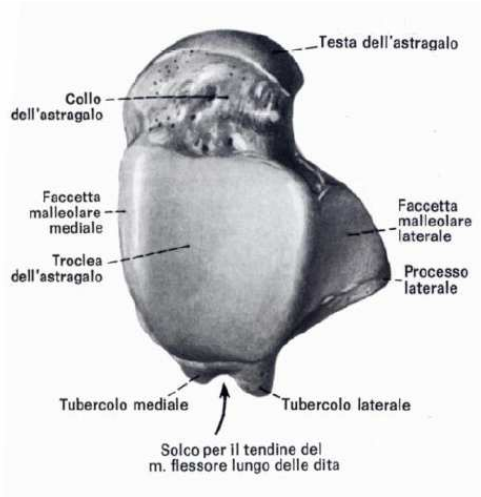


Fig. 1.3. Visione dorsale dell'astragalo destro.

Il **calcagno**, situato sotto l'astragalo, è l'osso più voluminoso del tarso e su di esso gravano più direttamente le sollecitazioni statiche e dinamiche applicate al piede. Il calcagno si proietta posteriormente ed è costituito da due porzioni distinte: il corpo (centrale) e la tuberosità posteriore, destinata a fornire il punto d'appoggio al suolo

.

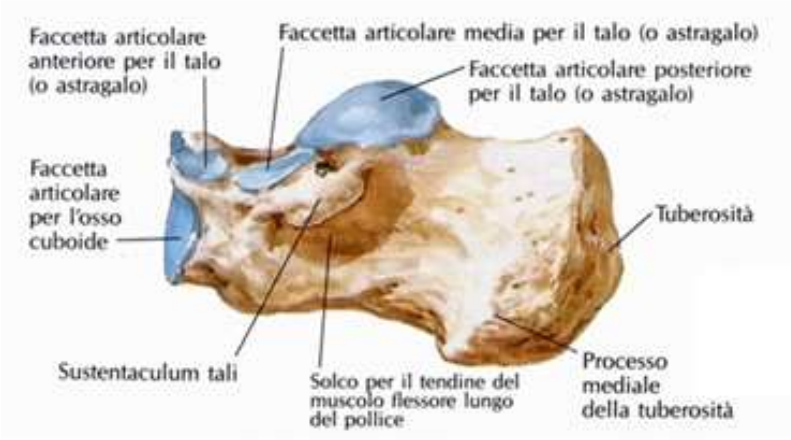


Fig. 1.4. Visione laterale del calcagno.

Il corpo si rigonfia indietro in una tuberosità; la cui faccia posteriore nella parte superiore è liscia, mentre nella parte inferiore è rugosa e termina con due tubercoli, il processo mediale e il processo laterale della tuberosità del calcagno, dove il primo è più voluminoso del secondo. Sulla parte inferiore della faccia posteriore della tuberosità si inserisce il tendine d'Achille. La superficie superiore del calcagno è principalmente caratterizzata dalle facce articolari per l'astragalo, che sono tre: la faccia articolare posteriore è ovale, le facce articolari media ed anteriore sono rispettivamente sostenute dalla piccola apofisi e dalla grande apofisi, sono fra loro in continuità e, incontrandosi, formano uno spigolo; sono pianeggianti e l'anteriore è assai piccola. Tra la faccia articolare posteriore e le altre rimane un solco, il solco del calcagno che, combinandosi col solco dell'astragalo, formano insieme una specie di canale: il seno del tarso. La faccia mediale del calcagno è rappresentata da una larga doccia obliqua compresa tra il processo mediale della tuberosità e la piccola apofisi; essa rappresenta la via che tengono gli organi che dalla faccia posteriore della gamba si avviano verso la regione plantare. La faccia laterale, pianeggiante e rugosa, si prolunga dal corpo sulla grande apofisi, dove il limite tra questi due è un tubercolo, il processo trocleare, al di sotto del quale c'è un solco obliquo, il solco del muscolo lungo peroniero per il tendine di questo muscolo. Sopra vi è un altro solco, nel quale decorre il tendine del muscolo peroniero breve. Sulla faccia inferiore, ricca di fori vascolari, si trovano indietro i processi della tuberosità del calcagno, la quale è rugosa e si prolunga dal corpo sulla grande apofisi;

termina con un rilievo, la tuberosità anteriore. La faccia anteriore, con la quale termina la grande apofisi, è una superficie rivestita di cartilagine, la faccia articolare cuboidea, che serve all' unione col cuboide; è quadrilatera, leggermente convessa in senso laterale, leggermente concava in senso verticale. Il margine superiore di questa faccia è medialmente in contatto con la faccia articolare anteriore per l'astragalo ed è alquanto sporgente.

Le **ossa della fila centrale** del piede sono: lo scafoide, i tre cuneiformi e il cuboide.

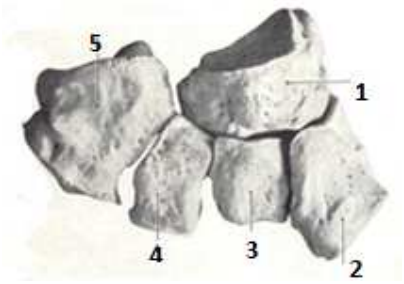


Fig. 1. 5. Scafoide ed ossa della fila distale del tarso destro articolate tra di loro, viste dall'alto e un pò da dietro. 1, Scafoide; 2, 1° cuneiforme; 3, 2° cuneiforme; 4, 3° cuneiforme; 5, cuboide.

L'**osso scafoide (navicolare),** che è osso centrale del tarso**,** è situato sul lato mediale del piede, davanti all'astragalo, dietro i tre cuneiformi. E' appiattito dall'avanti all'indietro, ha contorno ovale e ha l'asse maggiore diretto obliquamente in basso e medialmente. La sua faccia prossimale, o posteriore, è una superficie articolare ellittica, molto concava e regolare, rivestita da cartilagine e si articola con la testa dell'astragalo. La sua faccia distale, o anteriore, anch'essa articolare, è divisa da due creste smussate, convergenti in basso, in tre faccette articolari, triangolari, corrispondenti ai tre cuneiformi. La faccia mediale è più estesa e leggermente convessa, le altre due sono pianeggianti. Il contorno dell'osso è rugoso; nella superficie dorsale è più largo che nella plantare; alla sua estremità mediale si prolunga in una tuberosità, la tuberosità dell'osso scafoide. Lì si inserisce il tendine principale del muscolo tibiale posteriore. Al di sotto della suddetta tuberosità, nella superficie plantare, si trova un solco diretto verso il 3° cuneiforme, per un fascio tendineo dello stesso tibiale posteriore.

I **cuneiformi** sono le ossa della fila distale del tarso e sono tre: mediale, intermedio e laterale. Sono situate prossimalmente tra il navicolare (per il quale presentano , ciascuna, una faccia articolare prossimale) e il metatarso corrispondente, distalmente (per il quale presentano una faccia articolare distale). Hanno tutti la forma di un cuneo con un apice, che per il secondo e il terzo cuneiforme si presentano come delle tuberosità rivolte verso la pianta del piede.

L'**osso cuboideo (cuboide)** ha la forma di un cuneo, con l'estremità corrispondente al margine laterale del piede. La base o faccia mediale presenta una faccetta articolare per il 3° cuneiforme e dietro a questa ha un'altra faccetta per l'articolazione con l'osso scafoide; nella rimanente parte è rugosa per l'inserzione di legamenti. La faccia superiore o dorsale, che scende obliquamente verso il margine laterale del piede, è rugosa e le è sovrapposto il muscolo estensore breve delle dita. La faccia inferiore o plantare si distingue per una sporgenza allungata, obliquamente diretta in avanti e medialmente, che si prende il nome di tuberosità (cresta) dell'osso cuboide. Sul versante anteriore è rivestita di cartilagine e lì scorre il tendine del muscolo lungo peroneo. Davanti alla cresta c'è un solco, che prende il nome dal suddetto tendine. La parte della faccia plantare che sta al di dietro della cresta è rugosa e si prolunga indietro e medialmente in un tubercolo. La faccia posteriore, rivestita di cartilagine forma un'articolazione a sella con la faccia articolare cuboidea del calcagno. La faccia anteriore presenta una superficie articolare divisa da una leggera cresta verticale in due faccette, le quali servono per l'articolazione col 4° e 5° osso metatarsale. L'estremità (apice) del cuneo cuboideo, verso la quale convergono le facce dorsale e plantare, corrisponde al margine laterale del piede.

Ossa metatarsali

Fig. 1.6. Ossa metatarsali viste dal lato dorsale. I, 1° metatarsale; II, 2° metatarsale; III, 3° metatarsale; IV, 4° metatarsale; V, cuboide.

E' il segmento medio delle ossa del piede e si estende obliquamente dalle ossa distali del tarso alla base delle dita. E' composto di cinque ossa, le ossa metatarsali, lunghe e parallele e vengono distinte con un numero ordinale dal lato tibiale al lato fibulare. In dietro sono articolate col tarso e sono a reciproco contatto tra loro; rimangono separate per gran parte della loro lunghezza e si avvicinano l'una all'altra con la loro estremità anteriore, con la quale si articolano con lo scheletro delle dita. Ciascun osso metatarsale si compone di un corpo, un'estremità posteriore o base e di un'estremità anteriore o testa. Il corpo è prismatico triangolare, con una faccia dorsale, una faccia mediale ed una faccia laterale; quest'ultime due si incontrano a formare l'angolo inferiore, rivolto verso la pianta del piede. La faccia dorsale è strettissima, triangolare a base posteriore e grazie a una leggera torsione del corpo, la faccia laterale è inclinata verso il dorso del piede e la mediale verso la pianta; l'angolo inferiore è alquanto concavo. La base delle ossa metatarsali è assai voluminosa e con essa ciascun metatarsale si articola con le corrispondenti ossa del tarso. La faccia dorsale è larga e rugosa. Le facce mediale e laterale presentano una faccetta articolare per l'unione col metatarsale vicino; per il resto sono rugose per l'attacco dei ligamenti. S'incontrano in una cresta plantare. La testa delle ossa metatarsali è compressa lateralmente e presenta distalmente una superficie articolare sferoidale, che si estende principalmente dal lato plantare, la quale serve all'articolazione con la base della 1° falange; essa è circoscritta, tranne dal lato plantare, da un solco profondo. Da ciascun lato presenta due tubercoli sporgenti, uno dorsale e uno plantare, per l'attacco dei legamenti.

Falangi delle dita

Le cinque dita del piede si distinguono con un numero d'ordine dal lato tibiale al lato fibulare. Il primo dito si chiama alluce e l'ultimo mignolo o minimo.

Il loro scheletro è formato dalle falangi; ciascun dito ne possiede tre (1°, 2° e 3° falange); l'alluce ne ha solo due.

Fig. 1.7. Falangi delle dita del piede destro, viste dal lato dorsale.

Il corpo delle prime falangi, le quali sono meglio sviluppate delle altre, è sottile e cilindrico. Nelle seconde falangi il corpo è così breve che si confonde con le estremità.

Ossa sesamoidi

Nel piede si possono trovare, dal lato plantare due ossa, mediale e laterale a livello dell'articolazione metatarso falangea dell'alluce. Sono precedute da cartilagine e si ossificano di regola tra i 12 e i 14 anni.

Struttura di supporto del piede

La volta plantare è costituita da tre archi che mettono in relazione le tre parti fondamentali che lo costituiscono (calcagno, 1° e 5° metatarsale): l'arco anteriore, fra i punti di appoggio A e B, è il più corto e il più basso, l'arco interno, tra C e A, il più lungo e il più alto, e l'arco esterno, tra B e C di lunghezza e altezza intermedie. I suoi punti d'appoggio sono compresi nella zona di contatto con il suolo, detta impronta plantare. L'apice dell'arco plantare è nettamente spostato all'indietro e il peso del corpo

è applicato sulla parte posteriore, più precisamente in un punto al centro del collo del piede.

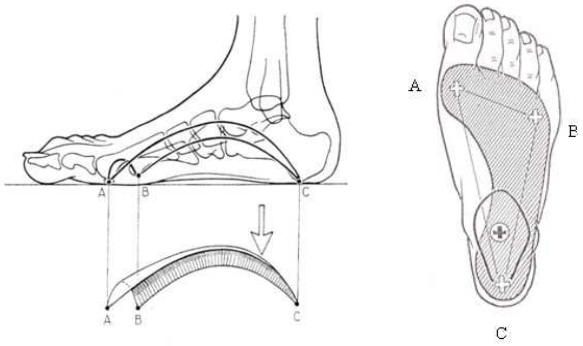


Fig. 1.8 . Arco plantare: AB, arco anteriore; AC, arco interno; BC, arco esterno.

L'**arco anteriore** passa per tutte le teste dei metatarsi, dalla prima alla quinta. La testa del primo appoggia su due sesamoidi, la seconda testa forma la chiave di volta ed è la più elevata; la terza e la quarta sono in posizione intermedia, quella del quinto metatarso è alla stessa altezza della prima. Questo arco presenta una concavità poco accentuata e appoggia al suolo per mezzo delle parti molli. L'arco anteriore è il punto di arrivo dei cinque raggi del metatarso: il primo forma un angolo di 18°-25°, 15° il secondo, 10° il terzo, 8° il quarto, mentre il quinto metatarso non supera i 5°. La curvatura trasversale va dall'avanti all'indietro e comprende solo quattro ossa a livello dei cuneiformi e appoggia soltanto a livello del cuboide. La chiave di volta è data dal 2° cuneiforme, mentre il 1° non appoggia al suolo. Inoltre, il 2°cuneiforme costituisce, con il secondo metatarso, l'apice della volta.

L'arco anteriore è sotteso dal tendine del peroneo laterale lungo, che agisce così con vigore sulla curvatura trasversale, la quale è mantenuta anche dalle espansioni plantari del tibiale posteriore, oltre che da tre muscoli: l'abduttore dell'alluce a direzione trasversale, il peroneo laterale lungo e le espansioni plantari del tibiale posteriore. La curvatura longitudinale è sostenuta dall'abduttore dell'alluce e dall'abduttore del quinto dito.

L'**arco interno** comprende cinque segmenti ossei: il 1° metatarso, che appoggia al suolo solamente con la testa; il 1° cuneiforme, che è interamente sospeso; lo scafoide, che è la chiave di volta di questo arco; il calcagno, che appoggia al suolo solamente con

la sua estremità posteriore. La trasmissione delle forze meccaniche dipende dalla disposizione delle travate ossee: le travate che escono dalla corticale anteriore della tibia, che percorrono l'arco di spinta posteriore, passano attraverso il corpo dell'astragalo e si espandono nel ventaglio sottotalamico verso la base posteriore dell'arcata; le travate uscite dalla corticale posteriore della tibia si orientano in basso e in avanti nel collo e nella testa dell'astragalo e attraversano lo scafoide e l'arco di spinta anteriore. Sono i legamenti e i muscoli a conservare la concavità dell'arco interno. I cinque segmenti ossei sono tenuti uniti da numerosi legamenti plantari: il tibiale posteriore, il peroneo lungo laterale, il flessore proprio dell'alluce, l'adduttore dell'alluce. Altri, invece, si inseriscono sulla convessità dell'arco: l'estensore proprio dell'alluce e il tibiale anteriore.

L'**arco esterno** è costituito da tre segmenti ossei: il 5° metatarso, il cuboide, il calcagno (le cui tuberosità posteriori costituiscono il punto d'appoggio posteriore dell'arcata). Questa volta prende contatto col suolo attraverso parti molli ed è poco elevata. Attraverso l'astragalo avviene la trasmissione degli sforzi meccanici. L'astragalo si appoggia sul calcagno per mezzo di due sistemi trabecolari: le travate anteriori e le travate posteriori: le prime si aprono sul ventaglio subtalamico, le seconde attraversano prima l'astragalo, il cuboide, per poi arrivare al 5° metatarso e all'appoggio anteriore. Oltre al ventaglio subtalamico, il calcagno è costituito da due sistemi trabecolari principali: un sistema arciforme superiore e uno inferiore, il primo, concavo verso il basso, lavora in compressione, il secondo, concavo verso l'alto, lavora in allungamento. Al contrario dell'arco interno, che è reso elastico dalla mobilità dell'astragalo sul calcagno, la volta esterna, per poter trasmettere l'impulso motore del tricipite, è molto più rigido e questo grazie al grande legamento calcaneo-cuboideo plantare, che è robusto e i cui fasci (profondo e superficiale) impediscono lo spostamento inferiore delle articolazioni calcaneo-cuboidea e cuboido-metatarsale sotto il peso del corpo. I tensori attivi di questo arco sono costituiti da tre muscoli: il peroneo laterale breve, che impedisce la separazione inferiore delle articolazioni, il peroneo laterale lungo, che sostiene elasticamente la sua estremità anteriore, l'abduttore del 5° dito, che forma la corda totale dell'arco esterno.

1.3. Componenti legamentose

I legamenti sono robuste strutture fibrose che collegano tra loro due ossa o due parti dello stesso osso. Sono formati da fibre di collagene di tipo I che possiedono una grande resistenza alle forze applicate in trazione. Le strutture legamentose svolgono essenzialmente una funzione stabilizzatrice, impedendo cioè che particolari movimenti o forze esterne alterino la posizione delle strutture ai quali sono collegati. La disposizione nel corpo umano dei legamenti è tale da permettere un loro intervento attivo solo nei gradi estremi del movimento, quando cioè l'integrità dell'articolazione è messa in serio pericolo. Nel piede, quindi, le strutture legamentose svolgono essenzialmente una funzione di stabilizzazione delle articolazioni permettendo, inoltre, il mantenimento della volta plantare. A causa della presenza di un elevato numero di segmenti ossei nel piede si contano più di 65 legamenti.

L'articolazione **tibio-tarsica** si trova fra le ossa della gamba ed il più alto osso del tarso e permette soprattutto movimenti di flessione e di estensione. Dato che è soggetta a grandissime sollecitazioni la sua capsula fibrosa risulta essere rinforzata da robusti apparati legamentosi medialmente e lateralmente tra i malleoli e le ossa del tarso. Essi sono il **legamento deltoideo** ed il **legamento laterale**. Il primo si irradia dal malleolo terminando con una larga base (tipo ventaglio) sullo scafoide, astragalo e calcagno. In base all'osso di arrivo può quindi essere suddiviso in altri 4 legamenti: legamento tibio-calcaneale, legamento tibio-scafoideo, legamento tibio-astragaleo anteriore e posteriore. Il secondo, invece, è formato da 3 legamenti, completamenti distinti, che dal malleolo fibulare si dirigono verso il tarso: legamento fibulo-astragaleo anteriore, legamento fibulo-astragaleo posteriore, legamento fibulo-calcaneale.

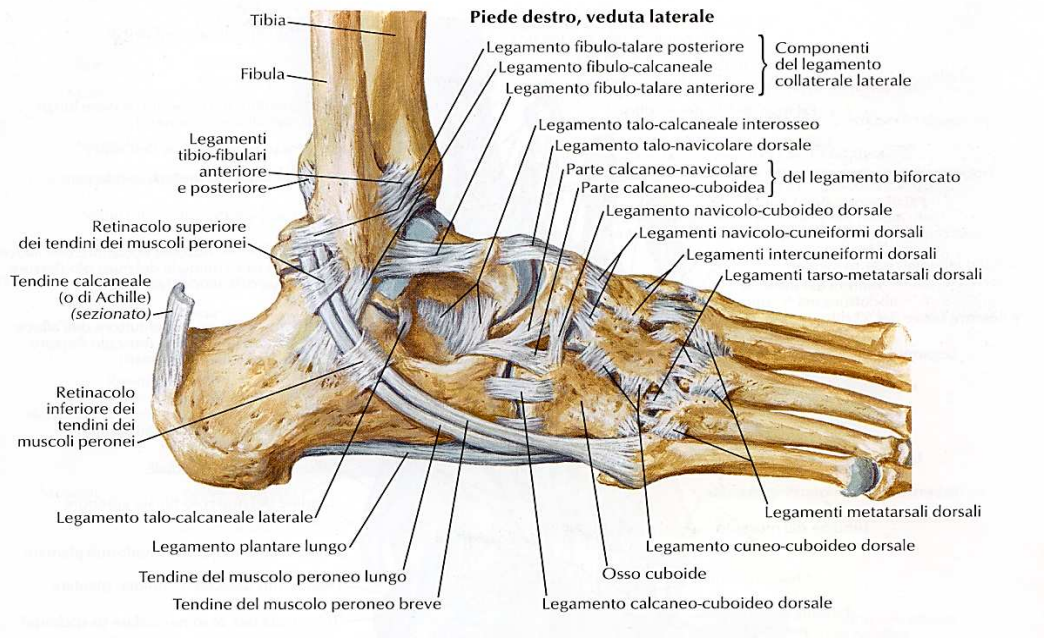


Fig. 1.9. Componenti legamentose del piede destro in veduta laterale.

Successivamente, nella zona intertarsica, si trovano altre 5 articolazioni di cui due molte importanti per il movimento di torsione. Esse formano una singola unità funzionale (l'articolazione inferiore) e sono: l'articolazione astragalo-calcaneale e l'articolazione astragalo-calcaneo-scafoidea che si sviluppano tra l'astragalo ed il calcagno. Entrambe queste articolazioni con i loro legamenti partecipano in maniera solidale ai movimenti di torsione, "in dentro" o "in fuori" a seconda delle direzioni degli scorrimenti. Uno dei legamenti più importanti è sicuramente il robusto legamento calcaneo-scafoideo-plantare che collega il calcagno con lo scafoide. Durante le torsione queste due ossa ruotano attorno all'astragalo e l'asse del movimento incontra un altro legamento fondamentale: il legamento interosseo astragalo-calcaneale, le cui lamine si avvolgono o si svolgono su loro stesse secondo la direzione del movimento. Gli altri legamenti appartenenti a queste due articolazioni (periferici, anteriori, posteriori, mediale e laterale) partecipano in minima parte al movimento di torsione ed il loro compito è soprattutto quello di rinforzare le capsule fibrose.

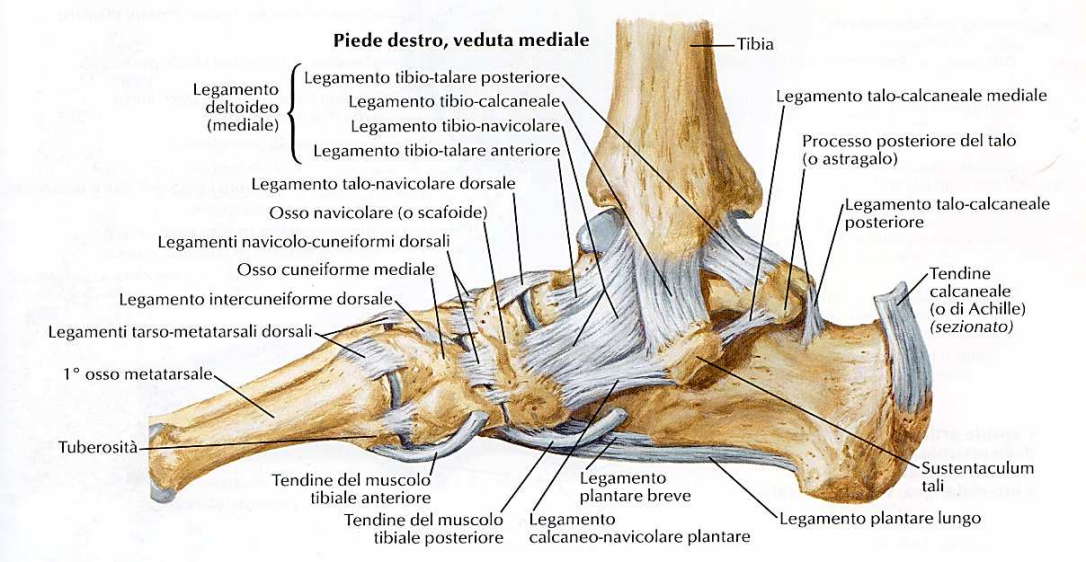


Fig. 1.10. Componenti legamentose del piede destro in veduta mediale.

Sempre nella zona intertarsica,tra calcagno e cuboide, si trova l'articolazione calcaneo-cuboidea i cui movimenti sono complementari a quelli dell'articolazione inferiore. Nella torsione "in dentro" il cuboide scorre dall'alto verso il basso e verso l'interno, in maniera da permettere all'apofisi del calcagno di sporgere sulla superficie dorsale del piede. Ovviamente nella torsione "in fuori" avviene il contrario. Viene poi coinvolta anche la volta del piede che tende ad incavarsi nella torsione "in dentro" e ad appianarsi nella torsione "in fuori". L'appiattimento completo è però impedito da due robusti legamenti plantari del piede: il legamento plantare lungo, un largo fascio che nasce dalla faccia inferiore del calcagno e termina sulla tuberosità del cuboide; e il legamento calcaneo-cuboideo plantare, praticamente sotto se non addirittura fuso con il precedente e quindi molto più vicino all'osso. La capsula fibrosa di questa articolazione è poi rinforzata da altri legamenti come il legamento biforcato che, partendo dal calcagno, si divarica in due fasci rispettivamente verso il cuboide e lo scafoide, rappresentando uno dei principali mezzi di connessione tra le ossa della prima e seconda fila del tarso.

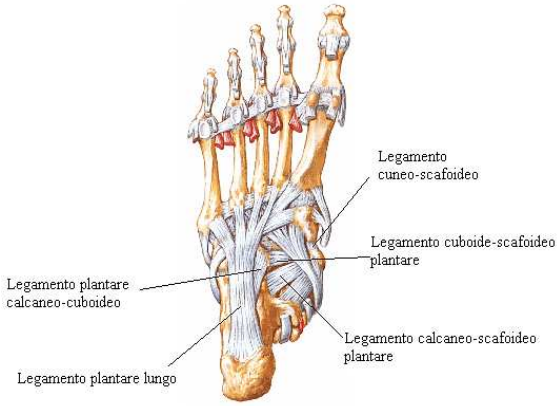


Fig. 1.11. Visione plantare del piede.

Scendendo verso lo scafoide si trovano poi altre due articolazioni in cui lo scafoide si collega al cuboide e ai tre cuneiformi. Nella prima i legamenti servono semplicemente ad unire le due ossa (scafoide e cuboide). Nell'articolazione scafo-cuneiforme invece è presente una capsula fibrosa il cui compito è quello di unire i tre cuneiformi grazie anche a dei legamenti dorsali e plantari che permettono solo semplici movimenti di scorrimento. Questi movimenti concorrono a dare al tarso la sua elasticità e a modificare la forma e la profondità della volta plantare durante la torsione esattamente come nell'articolazione calcaneo-cuboidea.

Esistono poi altre articolazioni, tarso-metatarsiche e inter-metatarsiche, che permettono limitatissimi movimenti di flessione, estensione e lateralità alle ossa ma che servono comunque a dare elasticità al piede e in piccola parte concorrono anche a modificare la forma e profondità della volta plantare. Un ruolo fondamentale è svolto dall'aponeurosi plantare una robusta fascia fibrosa che unisce la zona plantare interna del calcagno con la base delle dita. Questo legamento gioca un ruolo molto importante nella trasmissione del peso corporeo al piede durante la deambulazione e la corsa. In particolare quando il piede si eleva sulle punte staccando il tallone dal suolo l'aponeurosi plantare subisce una distensione.

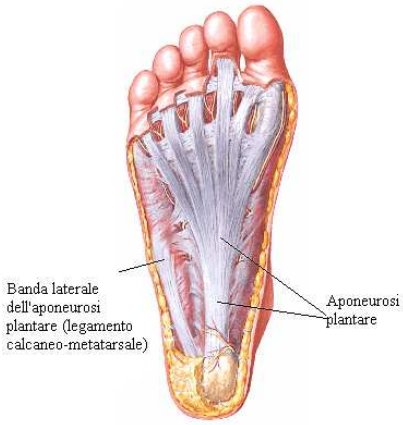


Fig. 1.12 Aponeurosi plantare.

Nei soggetti giovani l'aponeurosi plantare presenta una continuità con il tendine d'Achille a livello del tubercolo del calcagno. Con il passare dell'età però la connessione diminuisce sempre più riducendosi in età avanzata a poche fibre. Pur essendoci altri collegamenti tra il calcagno e rispettivamente il tendine d'Achille e l'aponeurosi plantare, la continuità tra questi due risulta essere molto importante soprattutto per il movimento di flessione delle dita del piede simultaneamente a quello della caviglia. Attualmente il ruolo principale della fascia plantare, in particolare la parte mediale, è quello di mantenere la conformazione a volta del piede e di costituire un efficace mezzo di protezione dei vasi e dei nervi. Di fondamentale importanza per la funzionalità complessiva del piede sono delle particolari strutture non direttamente riconducibili a componenti di natura legamentosa: i retinacoli. Si tratta essenzialmente di rinforzi e fascicoli di origine connettivale che, in corrispondenza degli estensori nella regione anteriore e distale della gamba formano il retinacolo superiore dei muscoli estensori e nella regione dorsale del tarso costituiscono il retinacolo inferiore dei muscoli estensori. La principale funzione che svolgono è quella di ruotare la direzione di applicazione delle azioni muscolari, permettendo allo stesso tempo di mantenere guaine mucose tendinee e i tendini stessi nella loro posizione anche durante la contrazione muscolare.

1.4. Componenti muscolari e tendinee

I muscoli della gamba hanno il loro corpo carnoso nella parte prossimale ed il tendine nella parte distale, per tale motivo la gamba si presenta più voluminosa in alto piuttosto che in basso. Essi vengono anche definiti estrinseci a differenza di quelli intrinseci che si inseriscono direttamente fra le ossa proprie del piede. I muscoli estrinseci presentano inserzione sulle ossa del piede e sulla tibia e/o perone. Tale tipologia di muscoli risulta essere caratterizzata dall'attitudine all'irrigidimento; questa capacità, parallelamente all'azione delle strutture legamentose, permette di conferire grande stabilità alla connessione podalica. I muscoli della gamba possono essere classificati in tre gruppi: anteriori, laterali e posteriori.

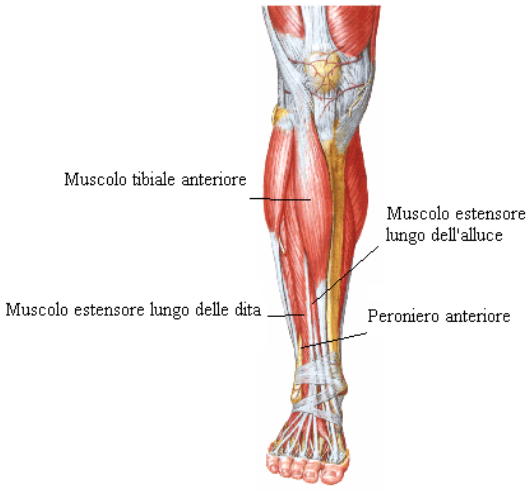


Fig. 1.13. Muscoli del gruppo anteriore della gamba.

I muscoli del primo gruppo riempiono lo spazio che rimane fra il margine anteriore della tibia e la faccia anteriore della membrana interossea. Tutti terminano nel piede e sono innervati dal nervo peroniero profondo. Tra questi si trova il **muscolo tibiale anteriore**: un muscolo lungo che va dalla tibia al margine mediale del piede. Le sue fibre convergono su di un tendine che si prolunga fino alla pianta del piede ed è visibile attraverso la pelle nel passare dalla gamba al piede. I movimenti prodotti da questo muscolo sono quelli di flessione e supinazione. Infatti con atto simultaneo flette dorsalmente il piede, sollevando il margine mediale e volgendo la punta in dentro.

Il muscolo estensore lungo delle dita: un muscolo allungato , appiattito in senso laterale e posto lateralmente nella parte anteriore della gamba. Partendo dalla tibia arriva fino alle ultime quattro dita. Esso estende la prima falange delle ultima quattro dita sulle ossa metatarsali. Flette il piede sulla gamba e ne solleva lievemente il margine laterale, volgendone la punta in fuori. Quindi, mentre concorre col tibiale anteriore alla flessione del piede, gli è antagonista rispetto ai movimenti di torsione.

Il **muscolo peroniero anteriore**: un fascio muscolare molto spesso situato lateralmente al precedente e contemporaneamente unito ad esso. Esso concorre agli stessi movimenti ed azioni dell'estensore lungo delle dita.

Il **muscolo estensore lungo dell'alluce**: un muscolo allungato , appiattito in senso laterale, posto nella parte anteriore della gamba. Esso parte dalla fibula e termina, con il suo relativo tendine, nell'alluce, unendosi con il tendine del muscolo estensore breve. Questo muscolo estende l'alluce, flette il piede sulla gamba e concorre, col muscolo tibiale anteriore, al movimento di torsione in dentro del piede.

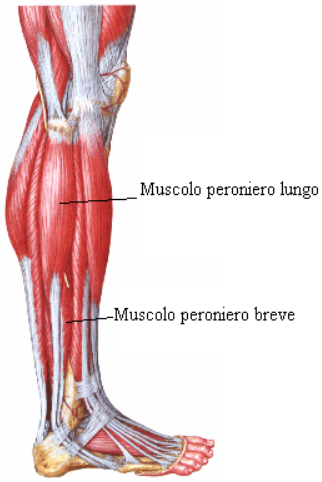


Fig. 1.14. Muscoli del gruppo laterale della gamba.

I **muscoli del gruppo laterale** nascono invece dalla fibula e terminano nel piede, ricoprendo la prima fino alla sua estremità distale. Sono innervati dal nervo peroniero superficiale. Essi sono: il muscolo peroniero lungo e il muscolo peroniero breve. Entrambi sono muscoli lunghi ed appiattiti, che partono dalla fibula e terminano

rispettivamente sul primo e sul quinto osso metatarsale. Essi abducono il piede e ne sollevano il margine laterale (movimento di torsione in fuori). Per il fatto che il tendine del peroniero breve decorre al di dietro del malleolo fibulare, i due muscoli peronieri, servendosi di questo quale puleggia di riflessione, realizzano l'estensione dorsale, nonché l'abduzione e la pronazione del piede. Pertanto essi concorrono all'estensione del piede con i muscoli posteriori della gamba ma ne sono antagonisti in tutti gli altri movimenti.

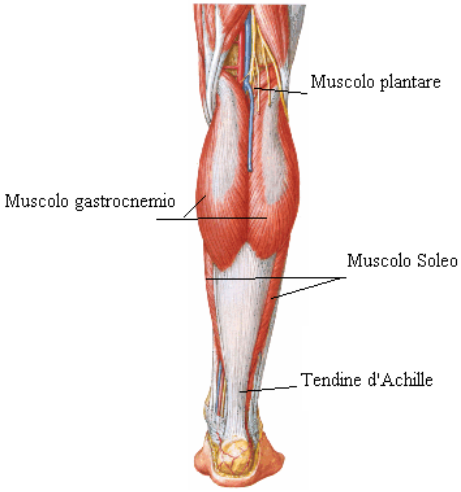


Fig. 1.15. Strato superficiale del gruppo posteriore.

I **muscoli della regione posteriore** della gamba sono disposti in due strati: superficiale e profondo e sono tutti innervati dal nervo tibiale. Il primo strato (che ricopre quasi completamente lo strato profondo) determina la sporgenza del polpaccio ed è formato dal tricipite della sura e dal muscolo plantare: un muscolo rudimentale posto fra il gastrocnemio ed il soleo che parte dal femore per arrivare fino al calcagno. Esso è soggetto a molteplici variazioni e molto spesso non è nemmeno presente. Concorre in minima parte all'azione del gastrocnemio, tende la capsula articolare del ginocchio ed evita che pieghe della sinoviale vengano compresse nel movimento dei capi ossei. Il muscolo tricipite della sura è invece un muscolo robusto , lungo , appiattito, molto largo e grosso che si estende dal femore, dalla tibia e dalla fibula fino al calcagno. Esso è formato da un muscolo posteriore a due capi, il gastrocnemio e da un muscolo anteriore, il soleo: essi sono separati all'origine ma si uniscono alla fine in un tendine terminale

comune, il tendine calcaneale o d'Achille. Il muscolo gastrocnemio è un grosso muscolo a due capi, laterale e mediale, posto superficialmente nella faccia posteriore della gamba che va dal femore al calcagno. Ad esso il polpaccio deve particolarmente il suo volume e la sua forma. Il principale movimento determinato dalla contrazione di questo muscolo è la estensione del piede sulla gamba (usato nel camminare, saltare ecc.). Da sottolineare però come la sua contrazione possa avvenire solo se la gamba è in estensione sulla coscia. Determina poi anche la torsione in dentro del piede (azione supinatoria).

Il **muscolo soleo** è invece un grosso muscolo appiattito, affusolato, posto davanti al gastrocnemio che va dalla gamba al calcagno. È quasi completamente coperto dal gastrocnemio, soltanto lungo i margini è libero da questo rapporto e diviene sottofasciale. Nello spazio fra questi due muscoli scorre poi il tendine del plantare. Essendo legato al gastrocnemio i loro movimenti sono molto simili, a differenza di questo però il soleo, non risalendo fino al femore, può agire anche se la gamba è in flessione sulla coscia. Spetta quindi al soleo un'azione iniziale di estensione dorsale e di supinazione, continuata poi dai gemelli, per una normale deambulazione. La posizione terminale del piede durante il cammino è poi ottenuta grazie ad una componente pronatoria formata da altri muscoli.

Fig. 1.16. Tendine d'Achille e relativi muscoli.

Il tendine d'Achille è il tendine comune del tricipite della sura. Prende origine dalla riunione del tendine del gastrocnemio e di quello del soleo, un po' al di sotto della parte

media della gamba. È straordinariamente robusto, risultando il più voluminoso del corpo umano. Dapprima largo si restringe per poi re ingrossarsi, misurando dove nel punto più stretto 5-6mm. Arrivato dietro il calcagno si allarga alquanto e termina fissandosi sulla metà inferiore della faccia posteriore di questo osso. Il rilievo formato dal tendine calcaneale è visibile attraverso la pelle ed un solco verticale lo separa da ciascun malleolo.

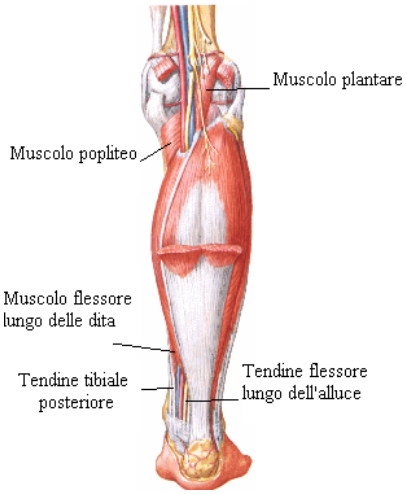


Fig. 1.17. Strato profondo del gruppo posteriore.

Lo **strato profondo dei muscoli posteriori** è invece formato da quattro muscoli direttamente applicati contro le ossa della gamba. Il muscolo popliteo è un muscolo triangolare, appiattito, situato profondamente nella parte posteriore del ginocchio. Nasce con un tendine robusto e curvilineo in una fossetta sotto al femore, la sua faccia anteriore è applicata sull'articolazione del ginocchio e sulla tibia, dove termina. Esso flette la gamba e la ruota in dentro qualunque sia il suo punto fisso.

Il **muscolo flessore lungo** delle dita è un muscolo allungato, appiattito che ha origine sulla tibia, esattamente al di sotto del soleo. Le sue fibre si dirigono in basso per terminare attorno ad un lungo tendine che, decorrendo dietro il malleolo e sul calcagno, termina sulla pianta del piede dove si divide in quattro tendini secondari che divergono verso le quattro dita del piede. Esso flette fortemente la terza falange sulla seconda e quest'ultima sulla prima. Al massimo della sua contrazione flette leggermente le prime

falangi sulle ossa metatarsali. Imprime alle dita una torsione sul loro asse ed è pure estensore dorsale, adduttore e supinatore del piede. Infine partecipa al mantenimento in alto della volta plantare ed a sollevare il corpo sopra le dita.

Il **muscolo tibiale posteriore** è un muscolo allungato, appiattito, che nasce dietro la membrana interossea fra la tibia e la fibula. Le sue fibre si raccolgono su di una lamina tendinea che si trasforma al di sopra del malleolo in un tendine cilindrico. Quest'ultimo, dopo aver preso rapporto con tibia, malleolo ed astragalo, raggiunge la pianta del piede, inserendosi principalmente sul tubercolo dello scafoide ed inviando fasci fibrosi verso i tre cuneiformi. Esso estende in minima parte il piede sulla gamba, lo porta in adduzione e soprattutto lo fa ruotare in dentro (torsione in dentro o supinazione). Insieme al peroniero lungo trae medialmente la volta plantare, impedendo l'appiattimento del piede sotto il peso del corpo.

Il **muscolo flessore lungo dell'alluce** è un muscolo allungato, cilindrico che prende origine sulla faccia posteriore e sul margine inferiore della fibula. Le sue fibre convergono attorno ad un tendine che occupa quasi tutta l'altezza del muscolo e che, dopo aver scavato nell'astragalo e nel calcagno, giunge sulla pianta del piede terminando il suo percorso alla base della seconda falange dell'alluce. Esso flette fortemente la seconda falange dell'alluce sulla prima e debolmente la prima sull'osso metatarsale. Concorre al movimento di flessione del secondo dito ed è pure estensore dorsale, adduttore e supinatore del piede. È il muscolo che nella marcia disimpegna il piede dal terreno e in caso di difetti è causa della conformazione del piede piatto.

Oltre ai muscoli proveniente dalla gamba, il piede è provvisto di muscoli propri che servono per i movimenti delle falangi. Ovviamente esiste una profonda differenza con i muscoli della mano a causa delle diverse funzioni che devono svolgere. Con l'evoluzione infatti , mentre la mano è diventata essenzialmente un organo di pressione, il piede si è sviluppato come organo di sostegno e locomozione. Questi muscoli sono: il muscolo estensore breve delle dita, che si trova sul dorso del piede e ha principalmente la funzione di estendere e inclinare le falangi, soprattutto la prima. I muscoli della pianta del piede che svolgono la funzione di adduttori, flessori ed estensori delle falangi.

1.5. Componenti adipose

Nella regione dorsale del piede il tessuto sottocutaneo è rappresentato da uno strato di tessuto connettivo lasso a struttura lamellare, debolmente unito alla cute. Nelle donne e nei bambini può contenere più adipe rispetto all'uomo. Inoltre il tessuto sottocutaneo prende i caratteri di quello plantare quando si avvicina ai margini del piede. Medialmente vi è un passaggio graduale, contrariamente nella parte laterale il passaggio risulta repentino. La regione plantare o pianta del piede comprende l'insieme delle parti molli che si dispongono nella faccia inferiore del piede. La regione plantare ha la forma di un quadrilatero allungato nel senso distale prossimale, allargandosi man mano che si avvicina alle dita. Questa superficie non è tutta piana, ma sul suo margine mediale presenta una depressione, in corrispondenza alla quale il piede non riposa sul suolo. Questa depressione, chiamata volta plantare, è dovuta alla disposizione architettonica del piede. In questo tessuto connettivo si trovano tre borse sinoviali costanti che hanno sede in corrispondenza ai punti di appoggio. Sono la borsa sotto la tuberosità distale del calcagno, la borsa sotto il primo metatarso e quella sotto il quinto metatarso. Questo tessuto svolge l'importante funzione di proteggere le strutture interne del piede e di attenuare l'ampiezza dell'onda d'urto che si genera nel ciclo del passo. La cute è liscia e fine nei punti che corrispondono alla volta plantare e che non sono compressi durante la deambulazione e la stazione verticale. Nei punti che servono di appoggio è più dura e spessa e talvolta, si formano delle vere e proprie callosità.

CAPITOLO 2

Caratterizzazione di differenti conformazioni del piede

2.1 Introduzione

La struttura del piede, come è stato appena illustrato, è davvero molto complessa; una sua minima alterazione può ripercuotersi sull'intero sistema provocando disturbi posturali o della deambulazione avvertiti solitamente con dolore. L'assetto del piede è diverso da persona a persona; esso dipende da vari fattori quali il peso, l'altezza, il sistema posturale o il modo stesso di camminare. Nel seguente capitolo, tuttavia, si porrà l'attenzione sui parametri e sulle caratteristiche comuni che definiscono le conformazione maggiormente riscontrate nel gruppo di soggetti considerato nel nostro studio: la conformazione del piede piatto e del piede cavo.

2.2 Piede piatto

Per piede piatto si intende una conformazione del piede caratterizzata dalla scomparsa più o meno totale della volta plantare, con conseguente appiattimento del piede.

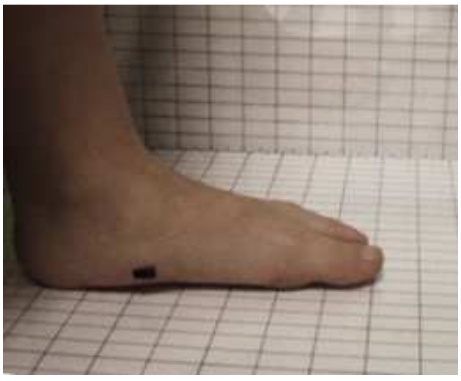


Fig. 2.1 Immagine dell'appiattimento della volta plantare.

Fig. 2.2 Immagine ottenuta da podoscopio dell'impronta plantare sotto carico per un piede piatto.

Un piede affetto da piattismo non poggia, come dovrebbe accadere, in tre sole aree della superficie plantare(calcagno, 1° e 5° metatarso) ma su quasi tutta la pianta del piede. La superficie d'appoggio dell'ismo, la zona del mesopiede che tocca il terreno lungo il bordo laterale, è maggiore di 1/3 della superficie d'appoggio dell'avampiede.

Il mantenimento dell'arcata plantare dipende da una adeguata interazione tra gli elementi muscolari (muscolo flessore lungo dell'alluce, muscolo flessore lungo delle dita), legamentosi (tendine d'Achille ed aponeurosi plantare) ed ossei (astragalo e scafoide), sottoposti alla regolazione del sistema nervoso che mantiene il tono muscolare e garantisce la coordinazione dei movimenti. Se ciò non accade gli effetti che possono verificarsi sono l'iperpronazione e la supinazione dell'avampiede ed il valgismo del retropiede: il calcagno va in flessione plantare e viene deviato verso l'esterno così da non essere più allineato con la retta perpendicolare al piano d'appoggio; l'astragalo effettua un movimento eccessivo di discesa in avanti, in basso e verso l'interno.

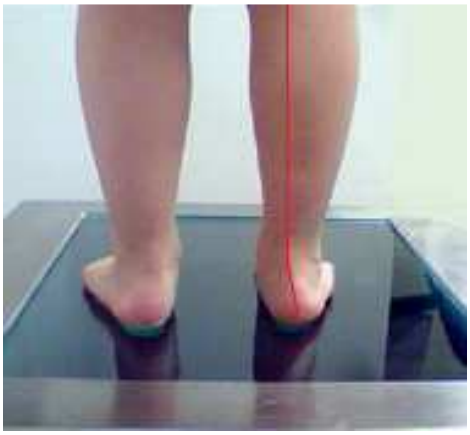


Fig. 2.3 Immagine del fenomeno di valgismo del retropiede.

Le cause che portano ad una scarsa resistenza della struttura della volta plantare e l'ipotonia dei muscoli plantari possono essere differenti: anomalie delle ossa dei piedi sin dalla nascita; fratture mal consolidate, anomalie dei muscoli che permettono il movimento del piede, anomalie dei legamenti o delle articolazioni, infezioni o paralisi.
La conformazione del piede piatto viene trattata in modo differente in base all'età in cui si presenta. Prima del completo sviluppo dell'arcata plantare, che corrisponde all'età di circa 3 anni, quasi la totalità dei bambini presenta un piede piatto; la maggior parte di questi casi, con lo sviluppo della muscolatura e della struttura ossea, recupera la corretta fisiologia del piede al contrario dei casi di piattismo puro che, non dipendendo dallo da un'ipotonia muscolare ma da fattori genetici, non ripristinano i normali rapporti anatomici. Questa tipologia di piedi piatti tende a progredire e a divenire nel tempo invalidante se non affrontata; può portare molto spesso ad una pronazione (piede piatto pronato) o ad una supinazione(piede piatto supinato) dell'avampiede .
Ci sono poi forme di piattismo che dipendono da altri fattori come: obesità e sovrappeso, debolezza muscolare, malattie neurologiche, abitudini posturali errate o calzature inadeguate.

La gravità del piede piatto viene suddivisa in tre gradi:

- 1° grado: l'arco longitudinale risulta ridotto, ma è ancora presente. La funzionalità del piede è sostanzialmente normale, in particolar modo se esso non è sottoposto ad alcun carico.
- 2° grado: l'arco longitudinale non è più visibile. Si inizia ad assistere alla comparsa di sintomatologia dolorosa e all'alterazione morfologica del piede.
- 3° grado: l'arco longitudinale è mancante e si ha convessità del bordo mediale del piede.

Fig.2.4 Immagine della pianta del piede in tre diversi casi: 1°grado, 2° grado, 3° grado.

2.3. Il piede cavo

Per piede cavo si intende una conformazione del piede caratterizzata da una eccessiva concavità della volta plantare che comporta una superficie di appoggio ridotta in genere limitata al tallone ed alla parte anteriore con esclusione della porzione intermedia della pianta. Tale conformazione dipende da un eccessivo dislivello tra la parte posteriore del piede, che risulta normale, e quella anteriore che invece è flessa plantarmente. I soggetti portatori di piede cavo presentano pertanto un carico prevalente sull'avampiede sia perché la superficie di appoggio risulta minore, e pertanto aumenta il carico per unità di superficie, sia soprattutto perché l'avampiede durante il passo arriva prima del normale a terra e rimane in appoggio per un periodo maggiore.

Nei casi di modesta entità il piede cavo può essere del tutto asintomatico; in queste situazioni il piede ha una funzionalità pressoché normale, svolge meno bene la funzione di assorbimento delle sollecitazioni ma è molto efficace nella spinta.

Nei casi più gravi il piede cavo è associato al varismo del calcagno, in cui l'asse

longitudinale del piede devia all'interno della retta perpendicolare alla superficie di appoggio, ed una deformità ad artiglio delle dita; in questo caso possono verificarsi dei disturbi generalmente causati dall'eccessivo carico.

Fig.2.5 Immagine dell'eccessiva concavità della volta plantare di un piede cavo.

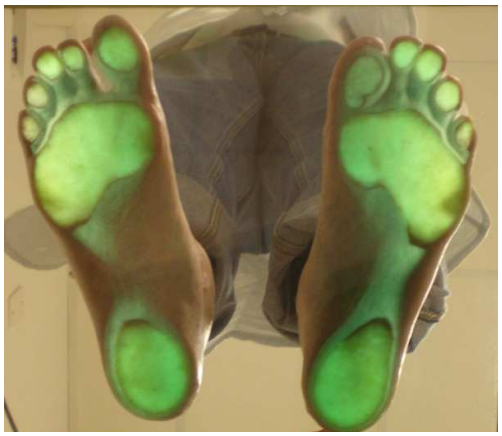


Fig.2.6 Immagine ottenuta da podoscopio dell'impronta plantare sotto carico per un piede cavo.

2.4. Movimenti di pronazione e supinazione

La pronazione è il normale movimento biomeccanico che il piede effettua verso l'interno, dalla fase di appoggio a quella di spinta, partendo dalla parte esterna del tallone passando al centro dell'arco plantare e verso l'interno dell'avampiede.

Una pronazione eccessiva fa sì che il piede continui a ruotare dopo l'impatto sul terreno invece di cominciare la fase di spinta; la distribuzione delle pressioni sulla superficie

plantare viene alterata: il peso del corpo è concentrato in prevalenza sulla parte interna dell'avampiede.

Una pronazione insufficiente, invece, viene chiamata con il termine di supinazione; il carico è mantenuto in prevalenza nella parte esterna del piede dalla fase di appoggio alla rullata ed alla spinta finale.

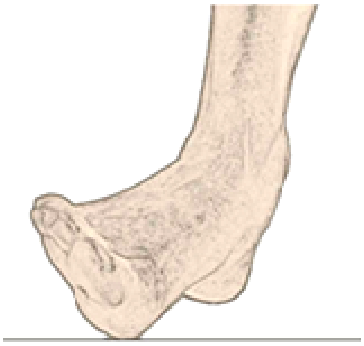


Fig.2.7 Movimento di pronazione.

Fig. 2.8 Movimento di supinazione.

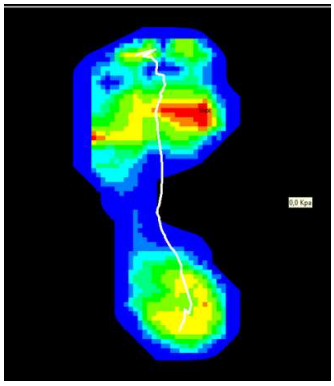


Fig. 2.9 Immagine ottenuta dall'analisi dinamica con pedana baropodometrica di un soggetto che compie un movimento di pronazione;si può osservare la concentrazione delle pressioni massime(in rosso) nella parte interna dell'avampiede.

2.5.Descrizione del gruppo di soggetti considerato

Lo studio affrontato in questa tesi è stato supportato da un'analisi sperimentale svolta su un gruppo di 57 soggetti caratterizzato come segue: 22 soggetti maschili e 35 soggetti femminili con età compresa tra i 5 e 77 anni e peso compreso tra i 17 e 110 Kg.

	maschi	femmine	totale
Numero soggetti	22	35	57

Tab. 2.1. Classificazione dei soggetti considerati in base al sesso.

	0-9	10-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	totale
maschi	6	8	2	2	1	2	1	/	22
femmine	1	5	6	1	6	4	8	4	35
totale	7	13	8	3	7	6	9	4	57

Tab. 2.2. Classificazione dei soggetti considerati in base all'età.

	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80	81-90	91-100	101-110	tot
maschi	1	5	2	2	1	4	1	1	2	1	22
femmine	1	/	/	5	14	8	2	3	1	/	35
totale	2	5	2	7	15	12	5	5	3	1	57

Tab. 2.3. Classificazione dei soggetti considerati in base al peso(Kg).

Di questi 57 soggetti 20 soggetti sono stati sottoposti all'analisi utilizzando il plantare prescritto dal medico; in particolare 15 soggetti hanno eseguito la procedura con un plantare costruito su misura mentre i rimanenti 5 soggetti con un plantare preconfezionato di tipo Podartis.

	Analisi con e senza plantare	Solo analisi senza plantare
maschi	9	13
femmine	11	24
totale	20	37

Tab. 2.4. Classificazione dei soggetti considerati in base alla tipologia di analisi effettuata.

	Plantare su misura	Plantare preconfezionato	Totale
maschi	8	1	9
femmine	7	4	11
totale	15	5	20

Tab. 2.5. Classificazione dei soggetti considerati in base alla tipologia di plantare utilizzato durante l'analisi

I soggetti considerati presentavano varie patologie e conformazioni: la conformazione maggiormente riscontrata è stata quella del piede piatto e del piede cavo.

	Piede piatto	Piede cavo	Altro	Totale
Plantare Preconfezionato	/	1	4	5
Plantare su misura	7	3	5	15
Totale	7	4	9	20

Tab. 2.6. Classificazione dei soggetti considerati in base alla conformazione del piede.

Nella categoria indicata con "Altro" sono comprese 2 piedi affetti da artrite reumatoide, 1 piede diabetico, e altri particolari conformazioni della colonna o del ginocchio.

E' importante precisare che la classificazione per conformazioni deve essere considerata a livello puramente indicativo; molto frequentemente, infatti, i pazienti non presentano un unico ben definito disturbo ma presentano contemporaneamente diverse conformazioni o la stessa conformazione che si sviluppa in modo diverso da paziente a paziente. Un tipico esempio è il caso del piede piatto che può essere di diversi gradi di gravità e può evolversi con la pronazione o meno dell'avampiede. Per la classificazione è stato considerato lo scompenso predominante, consapevoli della generalizzazione che si sta effettuando; ogni paziente infatti è un caso a sé con proprie caratteristiche morfometriche e biomeccaniche dove la patologia-conformazione arriva a svilupparsi in modo molto differente anche in soggetti che presentano il medesimo disturbo.

CAPITOLO 3

Descrizione della strumentazione utilizzata e delle prove sperimentali eseguite

3.1 Introduzione

La complessità della struttura del piede fa ben comprendere la difficoltà a determinare in modo immediato i difetti strutturali direttamente responsabili delle anomalie della postura e della deambulazione. Proprio per questo motivo si è avuta la necessità di affidarsi al supporto di alcuni strumenti in grado di effettuare un'analisi biomeccanica molto precisa; essa porta a determinare alcuni parametri fondamentali per la valutazione e per l'eventuale correzione della deambulazione e della postura di un soggetto.

Gli strumenti utilizzati sono stati resi disponibili dal laboratorio della sezione di Biomeccanica dell'Ospedale dell'Angelo di Mestre dove è stata svolta l'attività sperimentale collegata a questo elaborato. L'Unità operativa di Biomeccanica si occupa di fornire una valutazione clinico-strumentale dell'apparato locomotore con riguardo all'analisi del movimento, del passo e della capacità articolare sotto sforzo e ad eseguire una valutazione biomeccanica strumentale del gesto lavorativo.

Per poter ottenere dagli strumenti valori il più possibile confrontabili tra loro è stato stabilito di ideare una procedura da far eseguire con la stesse modalità e tempistiche a tutti i soggetti presi in esame; inizialmente prevede la raccolta dei dati morfometrici del piede, necessari per avere dei valori di riferimento che descrivono il soggetto in esame; successivamente sono state eseguite analisi con un podoscopio e con una pedana baropodometrica.

3.2 Descrizione del setup sperimentale

3.2.1. Pedana baropodometrica ACP LIGHT (BAT Buratto Advanced Technology S.r.l Treviso)

La pedana baropodometrica è un dispositivo medico attivo, non invasivo, che analizza il comportamento biomeccanico del piede. La Direttiva 93/42CEE 14 Giugno 1993 definisce un dispositivo medico attivo qualsiasi dispositivo medico dipendente per funzionamento da una fonte di energia diversa da quella generata direttamente dal corpo umano o dalla gravità; il funzionamento della pedana, infatti, dipende dalla fonte di energia elettrica. Definisce invece dispositivo medico non invasivo qualsiasi dispositivo che non entra né totalmente né parzialmente nel corpo umano.

L'analisi della deambulazione attraverso la pedana baropodometrica permette di individuare i difetti biomeccanici del piede; il compito principalmente svolto è il rilevamento delle pressioni in fase statica e durante la deambulazione che sono parametri indispensabili per valutare la stabilità e la qualità del movimento del soggetto in esame. Le acquisizioni di questo strumento sono precise, istantanee, ripetibili, non invasive e consentono di ridurre i controlli radiografici.

Il sistema baropodometrico è costituito da una pedana rivestita da uno strato di gomma sotto il quale sono stati applicati dei sensori di pressione collegati ad un sistema informatico che permette la raccolta e la visualizzazione dei dati rilevati.

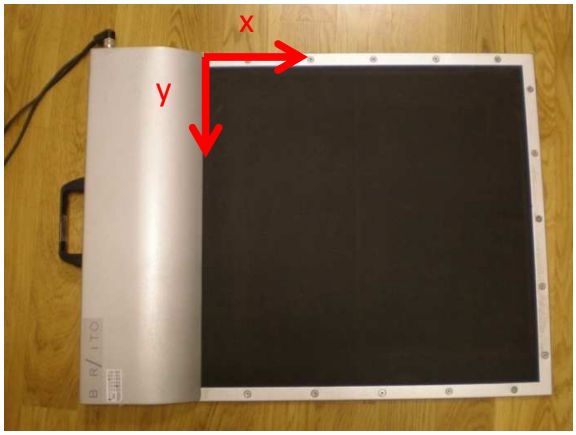


Fig. 3.1 Immagine dall'alto della pedana e sistema di riferimento scelto per le analisi.

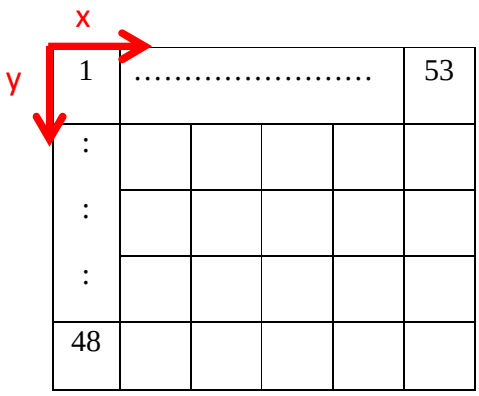


Fig. 3.2 Sistema di sensori della pedana e sistema di riferimento scelto per le analisi.

In seguito vengono riportate le caratteristiche tecniche dello strumento:

Numero sensori	2544
Area zona attiva	47,5x43 (cm)
Peso della pedana	8.5 Kg
Pressione massima	5 Kg/cm^2
Pressione minima	150g/cm^2
Risoluzione	150 g/cm^2
Grado di precisione	20%

Tab. 3.1 Caratteristiche tecniche della pedana baropodometrica.

I sensori di pressione utilizzati sono del tipo Force Sensing Resistance o Piezoresistivi: la pressione esercitata dal soggetto sulla pedana produce una deformazione sulla superficie dei sensori che, sfruttando la proprietà semiconduttiva di speciali materiali, causa la variazione della resistenza elettrica ai capi di due elettrodi, generando così il segnale elettrico corrispondente.

Collegando a questo elemento un sistema di misura in grado di leggere variazioni di resistenza, è possibile risalire all'entità della deformazione, e di conseguenza all'entità della pressione esercitata.

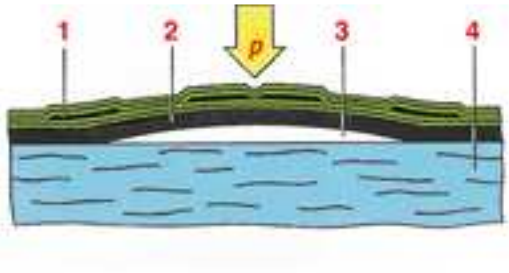
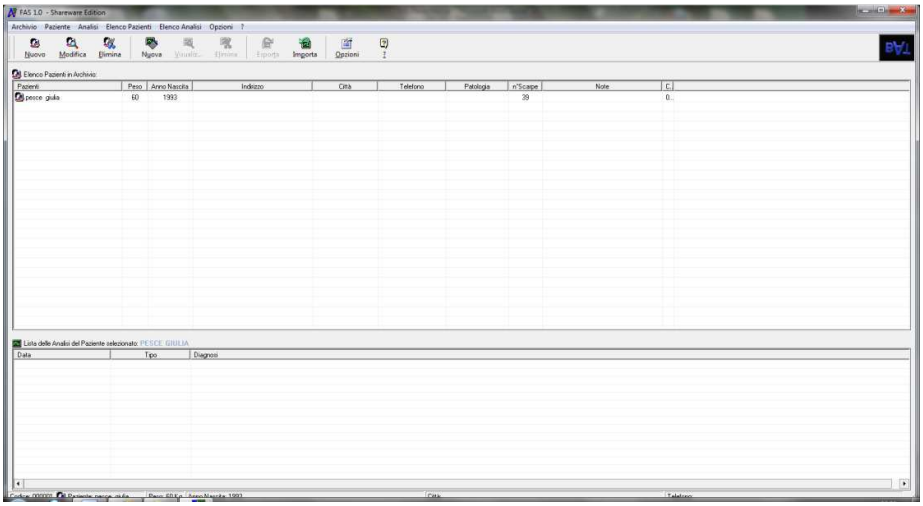


Fig.3.3. Sensore piezoresistivo.1 indicatore di costrizione piezoresistivo, 2 membrana, 3 bolla di pressione di riferiment, 4 strato di riferimento.

I valori dei dati ottenuti durante l'acquisizione vengono trasmessi ad computer provvisto del software in grado di visualizzarli e memorizzarli. L'interfaccia grafica del programma è molto simile a qualsiasi programma che funzioni in ambiente Windows: alle diverse funzioni corrispondono determinate finestre che vengono attivate tramite l'uso del mouse o della tastiera.



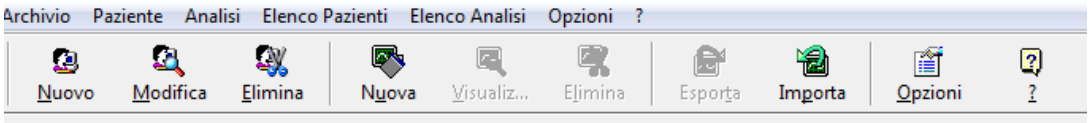


Fig. 3.4. Schermata visualizzata all'avvio del programma e ingrandimento delle varie funzioni che si possono attivare.

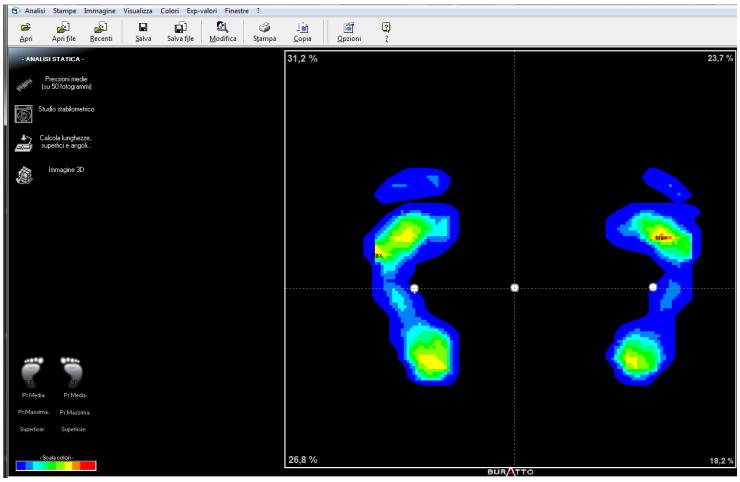


Fig. 3.5.Schermata visualizzata durante l'acquisizione dell'analisi statica

La gestione dei dati acquisiti è garantita dal data base del programma che ne consente una rapida archiviazione.

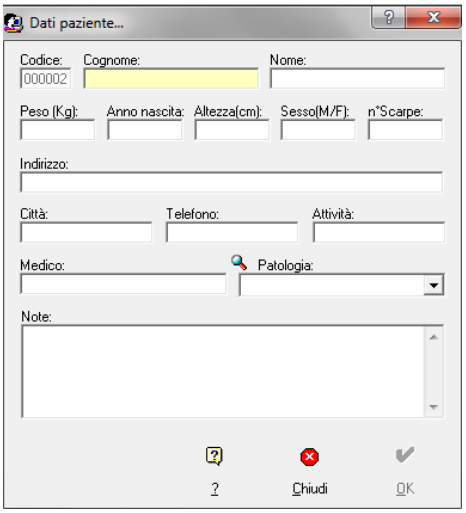


Fig. 3.6. Scheda da compilare per ogni paziente prima di effettuare qualsiasi analisi; permette una corretta archiviazione dei dati acquisiti

Esistono tre diversi tipi di analisi che si possono effettuare con la pedana:

- Analisi statica
- Analisi dinamica
- Analisi dinamica multipla

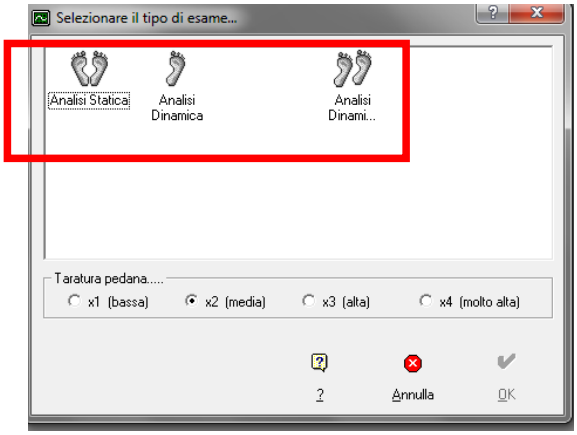


Fig.3.7. Finestra che si apre quando si effettua una nuova analisi; essa richiede la scelta tra l'analisi statica, l'analisi dinamica e l'analisi dinamica multipla

L'analisi statica

Per eseguire l'analisi statica il soggetto dovrà posizionarsi sopra la pedana con i piedi allineati, paralleli, braccia lungo il corpo e sguardo fisso in un punto.

Raggiunta la posizione appena descritta si darà il via alla registrazione che consiste nell'acquisizione di 50 frames. Si otterrà un'immagine relativa alla distribuzione pressoria come in figura 2.10.

Figura 3.9. Posizionamento sulla pedana in condizioni statiche.

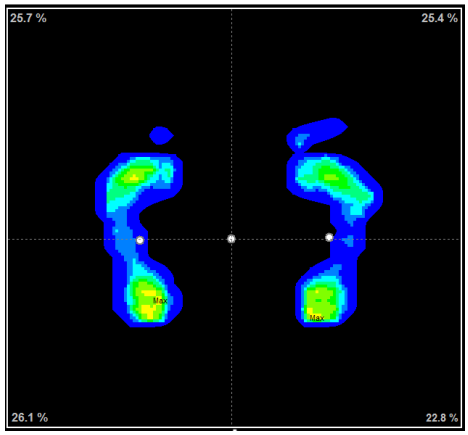


Figura 3.10. Distribuzioni pressorie in condizioni statiche.
Scala di pressione: 7 Kpa (blu)-225 Kpa (rosso)

L'esame permette di ottenere i valori di pressione media (kPa) e massima (kPa), la superficie di appoggio (cm^2), le coordinate del baricentro in funzione del sistema di riferimento della pedana e le percentuali di carico nella parte anteriore e posteriore di entrambi i piedi.

L'analisi dinamica

Per eseguire l'analisi dinamica è richiesto al soggetto di eseguire un passo all'interno della superficie della pedana in modo che il piede poggi completamente e non vi siano più passi contemporaneamente all'interno della zona attiva.

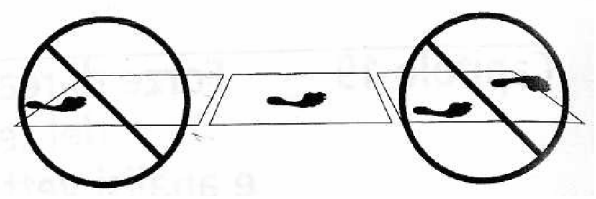


Figura 3.11 Contatto corretto ed errato sulla pedana baropodometrica.

L'esame dinamico permette la visualizzazione delle pressioni plantari e della curva dello spostamento di carico durante il passo; permette di ottenere i grafici della superficie delle pressioni medie, massime e della forza di reazione al suolo dei passi effettuati.

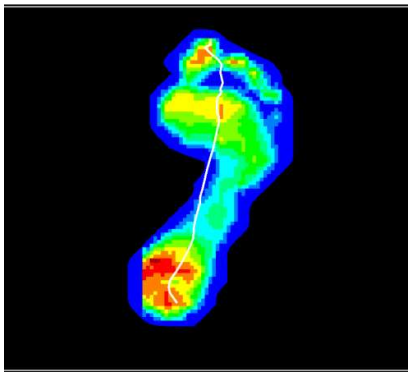


Figura 3.12. Distribuzioni pressorie in condizioni dinamiche e curva dello spostamento di carico. Scala di pressione: 7Kpa (blu)-225 Kpa (rosso)

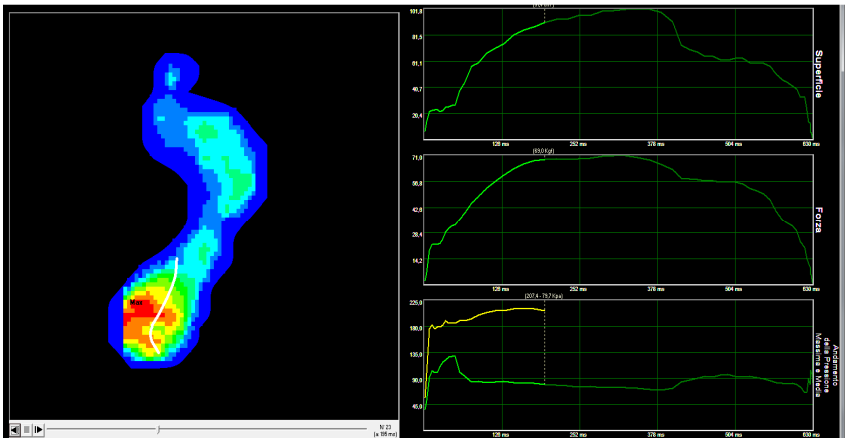


Figura 3.13. Visualizzazione delle pressioni plantari, dei grafici di superficie, forza di reazione e pressione massima/minima durante il periodo del passo.

Analisi dinamica multipla

L'analisi dinamica multipla permette di eseguire più acquisizioni dinamiche (fino ad un massimo di 20) una dopo l'altra senza interruzioni, permettendo di memorizzare solo quelli desiderati al fine di ricercare il passo "standard". Questa opzione riduce le influenze casuali che si possono verificare su un unico passo e rende più naturale l'esecuzione del passo visto che il soggetto è lasciato camminare liberamente senza particolari vincoli; essa tuttavia allunga i tempi di esecuzione.

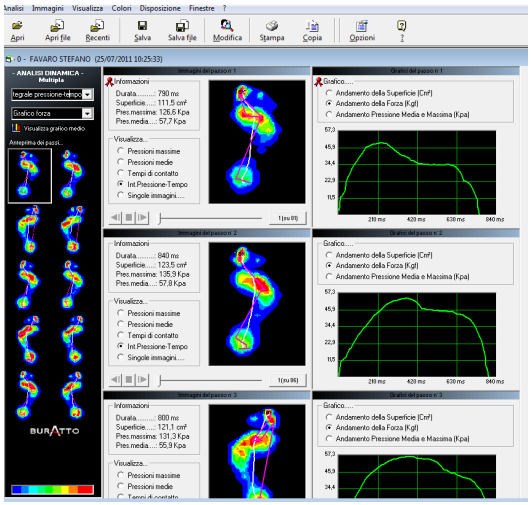


Figura 3.14. Visualizzazione della pressione media per ogni passo effettuato durante l'analisi dinamica multipla

3.2.2.Podoscopio

Il podoscopio è uno strumento costituito da una doppia lastra di cristallo dello spessore di circa 2 cm e da uno specchio che riflette l'immagine della pianta del piede.

La presenza nello strumento di una luce polarizzata conferisce alla superfice di appoggio del piede una caratteristica fluorescenza che permette di valutare con accuratezza e rapidità la situazione statica del piede evidenziando i punti di maggior carico.

Fig. 3.15. Immagine del podscopio vista laterale e dall'alto

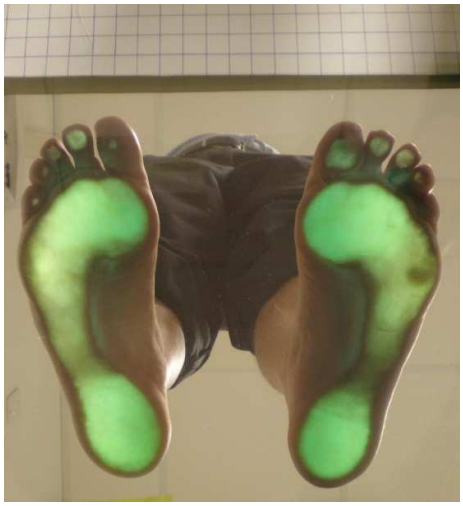


Fig. 3.16 Immagine visibile sullo specchio del podoscopio; le zone in verde sono le zone di carico.

3.3 Modalità di esecuzione della procedura

In seguito sono riportati i vari passi della procedura eseguita per ogni soggetti; tra parentesi sono riportati in modo indicativo i corrispondenti tempi di esecuzione.

Informazioni richieste al paziente (durata 1 min):

nome e cognome
anno di nascita (età)
peso
altezza
numero di scarpa
attività sportiva

Raccolta di dati morfometrici del piede (durata 5 min):

E' stato chiesto al soggetto di levare scarpe e calze, di sedersi sul lettino e poggiare il piede sinistro su uno sgabello avente un'altezza di circa 20 cm; il piede viene possibilmente poggiato con ginocchio e caviglia flessi a 90° in modo da avere il minor carico possibile sul piede. Il posizionamento del soggetto viene riportato in figura 3.16.

Fig. 3. 16 Posizionamento del soggetto per il rilevamento di misure morfometriche.

Come mostrato nella figura precedente il piano di appoggio e il piano verticale sono stati opportunamente graduati mediante l'utilizzo di due lastre in plexiglass suddivise in rettangoli aventi dimensioni di 2 x 1 cm.
Una volta posizionato il paziente, sono state scattate 2 fotografie mediante fotocamera digitale (risoluzione: 7.1 MegaPixel, obiettivo 38mm).

1. Immagine del piede lungo il piano sagittale per valutare:
    - la lunghezza del piede intesa come distanza tra la prominenza del calcagno e il termine del dito più lungo
    - altezza dell'arco interno intesa come la distanza tra il piano di appoggio e la prominenza dello scafoide segnalato con un marker

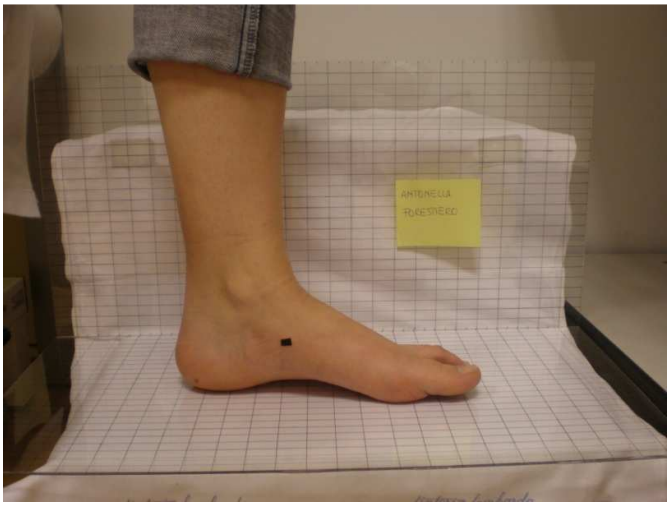


Fig. 3.18 Iimmagine del piede lungo il piano sagittale.

2. Immagine del piede vista dall'alto (Figura 3.19) in modo da valutarne la larghezza intesa come la distanza tra la prominenze esterne della testa del 1° e del 5° metatarso.

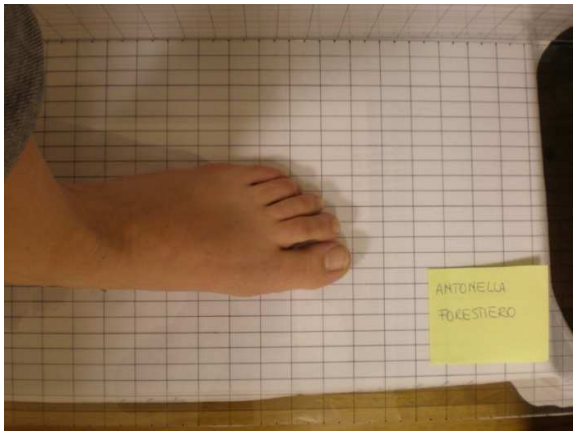


Fig. 3.19 Immagine del piede vista dall'alto.

Una volta prese le immagini si sono andate a valutare le grandezze precedentemente descritte prendendo come riferimento il piano graduato.

Valutazione dell'impronta del piede (durata 2 minuti)

Una volta raccolti i dati morfometrici è stato chiesto al paziente di salire su un podoscopio (Medmatica) a piedi scalzi. I piedi sono stati posizionati in modo da essere paralleli ed allineati.

Fig. 3.20 Impronta del piede sotto carico

In questo modo è stato possibile avere un'immagine dell'impronta del piede sotto carico e, in caso di necessità, è possibile ricavare le misure di interesse facendo riferimento alla scala graduata (1x1 cm) posta sullo specchio.

Valutazione dell'angolo di valgismo del calcagno (durata 2 minuti)

Nella medesima posizione descritta al punto precedente è stata scattata una foto (Figura 3.21) al retropiede in modo da valutare l'angolo di valgismo del calcagno.

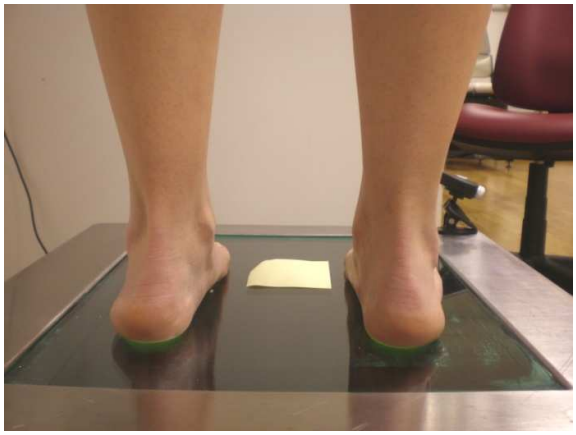


Fig. 3.21 Immagine del retropiede.

L'angolo di valgismo è l'angolo che si forma quando la retta perpendicolare al piano di appoggio che individua la direzione verticale e la retta che individua l'inclinazione con cui avviene l'appoggio del piede non sono allineate. La retta che rappresenta la reale inclinazione dell'appoggio viene costruita facendola passare per il punto medio della base del retropiede e il punto medio del segmento che collega i due malleoli. L'angolo di valgismo se maggiore di 2° è un indice di pronazione.

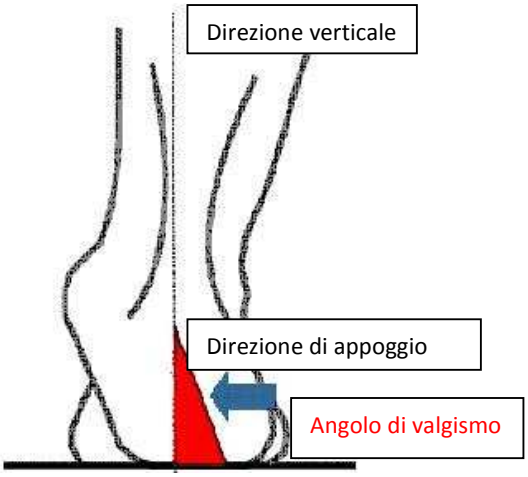


Fig.3.22 Schema di costruzione dell'angolo di valgismo

Prove con la pedana baropodometrica

Al fine di valutare la distribuzione pressoria plantare sia in statica che in dinamica è stata utilizzata una pedana baropodometrica ACP LIGHT (BAT Buratto Advanced Technology S.r.l Treviso).

TEST STATICO (durata 2 min):

Per eseguire la prova statica il paziente viene invitato a posizionarsi sulla pedana indossando un paio di copriscarpe. Dopo aver eseguito l'esame secondo le modalità descritte precedentemente, vengono esportati i valori rilevati. Un esempio di risultato viene riportato nella tabella seguente.

[…]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]
[14]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
[15]	0	0	0	0	0	0	21.1	0	0
[16]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
[17]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
[18]	0	0	17.6	70.3	77.3	70.3	42.2	42.2	0
[19]	0	42.2	98.4	130.1	119.5	123	49.2	84.4	0
[20]	38.7	105.5	130.1	151.2	119.5	63.3	45.7	66.8	0
[21]	63.3	84.4	94.9	84.4	42.2	24.6	31.6	28.1	0
[22]	87.9	80.9	70.3	49.2	0	0	0	0	0
[23]	66.8	49.2	49.2	21.1	0	0	0	0	0
[24]	45.7	45.7	28.1	0	0	0	0	0	0
[25]	0	35.2	28.1	0	0	0	0	0	0
[26]	0	49.2	42.2	21.1	0	0	0	0	0
[27]	0	31.6	35.2	28.1	0	0	0	0	0
[28]	0	35.2	42.2	31.6	0	0	0	0	0
[29]	0	0	35.2	45.7	0	0	0	0	0
[30]	0	0	21.1	56.3	45.7	0	0	0	0
[31]	0	0	21.1	56.3	63.3	56.3	17.6	0	0
[32]	0	0	21.1	98.4	123	105.5	59.8	0	0
[33]	0	0	35.2	112.5	140.6	151.2	123	21.1	0
[34]	0	0	31.6	84.4	133.6	126.6	**154.7**	45.7	0
[35]	0	0	**7**	105.5	147.7	144.1	130.1	28.1	0
[36]	0	0	0	42.2	126.6	147.7	102	0	0

Tab. 3.2.2 Distribuzione pressoria del piede sinistro durante il test statico preso come esempio. I numeri indicati tra parentesi quadre indicano le righe e le colonne che individuano la posizione dei sensori. La cella in giallo individua il sensore che rileva il valore massimo di pressione mentre la cella in verde individua il sensore che rileva il valore minimo di pressione.

STATICA [Pressioni medie in Kpa]
88,7 Kgf
B.Left: (90,3 : 289,7) mm
B.Body: (180,2 : 292,2) mm
B.Right: (296,2 : 295,4) mm

Tab. 3.23 Esportazione dati dell'analisi statica: peso del carico totale sostenuto da ciascun piede, coordinate del baricentro corporeo e quello relativo al piede destro e sinistro.

TEST DINAMICO (durata 10 min)

Una volta terminato il test statico viene chiesto al paziente di sottoporsi al test dinamico. Il soggetto viene invitato a camminare lungo un percorso di 8 m all'interno del quale è presente la pedana.

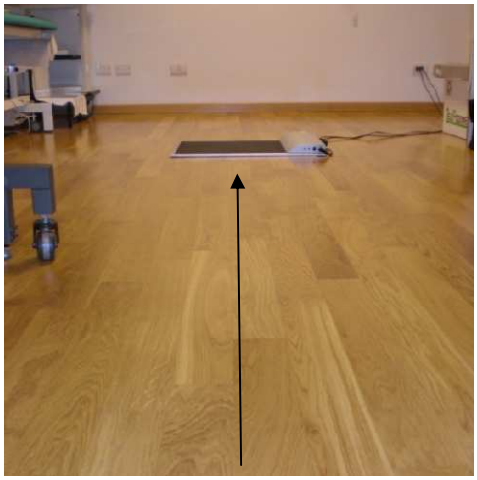


Fig. 3.23 Ttraiettoria percorsa dal paziente.

Il passo registrato dalla pedana verrà ripreso anche da una webcam opportunamente posizionata.

Fig. 3.24 Posizionamento della webcam.

Il paziente viene invitato a compiere lo stesso test più di 10 volte cercando di colpire la pedana almeno 5 volte con il piede destro e 5 con il piede sinistro.

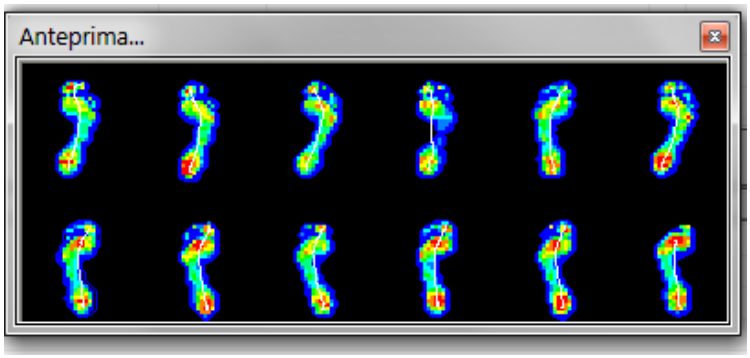


Fig. 3.25 Rappresentazione dei passi effettuati per l'analisi dinamica.

Per ciascun passo è possibile ottenere le seguenti informazioni:

l'andamento delle pressioni medie nel tempo

l'andamento delle pressioni massime nel tempo

l'andamento della componente normale della forza di reazione al suolo nel tempo

l'andamento della superficie di appoggio nel tempo

l'andamento delle coordinate baricentriche nel tempo secondo il sistema di riferimento stabilito

Prendiamo come esempio il passo effettuato con il piede sinistro che risulta essere più vicino alla media dei 7 passi:

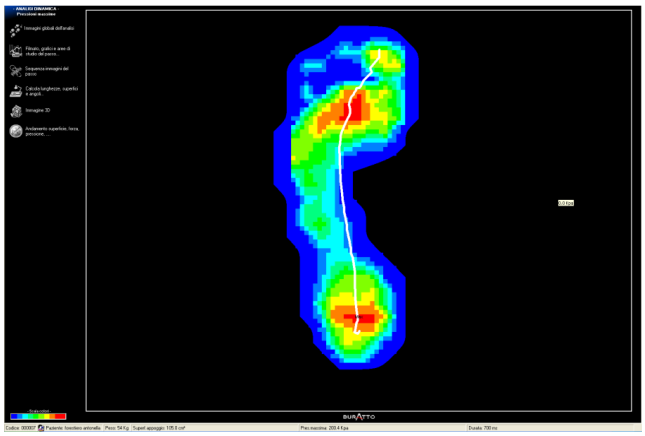


Fig. 3.28 Andamento del centro di pressione per un passo ottenuto dal test di dinamica multipla

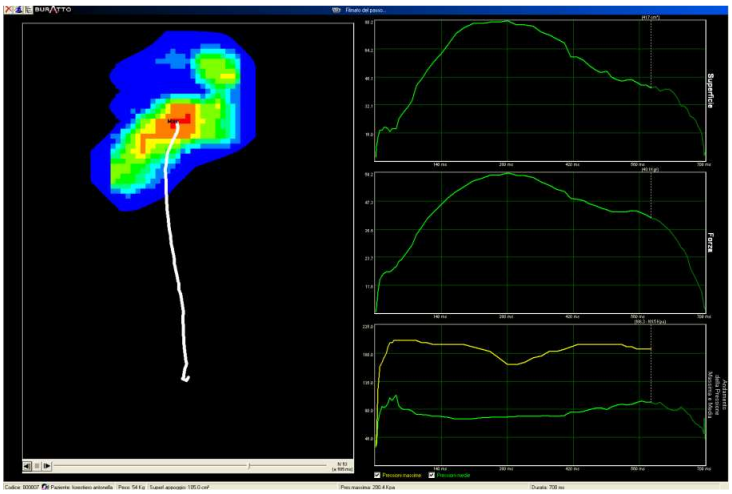


Fig. 3.29 a sinistra si ha la distribuzione pressoria durante le singole fasi del passo, a destra vengono riportati i grafici relativi alla superficie di appoggio (cm^2), alla componente normale della forza di reazione (kgf) al suolo e alle pressioni massime e medie (KPa) che si verificano durante il passo

Dai grafici è possibile ottenere i valori numerici:

VALORI dei GRAFICI della SUPERFICIE, FORZA, PRESSIONE MEDIA e MASSIMA e Coordinate del Baricentro rispetto al sistema di riferimento scelto							
[Frames]	[t..(ms)]	[S..(Cm^2)]	[F..(Kgf)]	[P.Max(Kpa)]	[P.Med(Kpa)]	[X(Cm)]	[Y(Cm)]
1	1	2.4	0.7	31.6	29.3	29.16	27.8
2	3	8.8	2.9	49.2	34.5	29.08	28
3	6	13.6	9.2	123	70.9	28.85	27.89
4	10	17.6	14.2	158.2	84.7	28.92	27.75
5	14	17.6	15.9	165.2	94.9	28.94	27.62
6	18	19.2	16.8	172.3	92.3	28.96	27.45
7	23	19.2	17.4	179.3	95.2	28.98	27.27
8	27	18.4	17.4	189.8	99.8	29.01	27.17
9	31	16.8	17.4	196.9	108.8	29.05	27.03
10	35	18.4	18.2	196.9	103.9	29.07	26.92
11	40	18.4	19	200.4	108.5	29.08	26.84
12	44	18.4	19.8	200.4	113.1	29.05	26.77
13	50	24.1	21.7	200.4	95.4	28.99	26.1
14	56	26.5	22.8	200.4	91	28.92	25.5
15	62	28.9	24.5	200.4	89.6	28.9	24.65
16	70	31.3	26.6	200.4	89.7	28.89	23.9
17	78	34.5	28.7	200.4	87.7	28.89	23.44
18	88	43.3	33.3	200.4	81.3	28.75	22.26
19	99	47.3	36.6	196.9	81.6	28.66	21.99
20	111	52.1	40.1	196.9	81.1	28.65	21.57
21	124	56.9	42.6	193.4	79	28.6	21.44
22	138	60.9	45.6	193.4	78.9	28.56	21.05
23	154	66.6	48.7	193.4	77.2	28.48	20.69
24	171	73	51.3	193.4	74.2	28.45	20.5
25	189	76.2	53.4	193.4	74	28.41	20.28
26	207	78.6	55.7	189.8	74.7	28.42	19.99
27	225	78.6	56.9	186.3	76.4	28.39	19.8
28	244	79.4	58.2	182.8	77.4	28.33	19.52
29	262	79.4	58.3	172.3	77.5	28.31	19.33
30	281	80.2	59.2	161.7	77.8	28.24	18.94
31	299	77.8	58.2	161.7	79	28.2	18.46
32	317	77.8	57.9	165.2	78.6	28.14	18.01
33	335	77	57.2	172.3	78.3	28.09	17.4
34	352	73.8	55.3	175.8	79.1	28.02	16.66
35	369	72.2	54.1	182.8	79	27.99	16.04
36	385	69.8	52.2	182.8	78.9	27.98	15.37
37	401	67.4	51.2	186.3	80.2	27.97	14.88
38	414	59.3	48.4	189.8	86	27.93	14.05
39	428	59.3	48	193.4	85.4	27.96	13.82

Tab. 3.3 Valori numerici riguardanti la superficie di contatto (S), le forze di reazione al suolo (F), le pressioni massime (P.max) e minime (P.Med), le coordinate del baricentro (X,Y) per ogni istante temporale

Riassumendo alla fine dell'intera procedura la cartella del nostr paziente dovrà contenere:

- 2 foto rilevanti lunghezza, larghezza, arco
- 2 foto rilevanti l'immagine podometrica e angolo tallone di entrambi i piedi
- video prova dinamica
- un file excel contenente i dati della prova statica
- un file excel contenente i dati della prova dinamica

L'intera procedura di acquisizione dati ha una durata totale di circa 20/25 minuti.

Le stesse prove sono state fatte senza calzatura, con calzatura senza plantare e con calzatura e plantare prescritto dal medico.

CAPITOLO 4

Caratterizzazione dei plantari utilizzati nel gruppo di soggetti considerato ed effetti riscontrati nell'analisi statica

4.1 Introduzione

Una gran parte di disturbi che colpiscono il piede, descritti nel capitolo 2, viene affrontata con l'utilizzo di plantari ortopedici; in commercio esiste un'enorme varietà di questi dispositivi che si differenziano principalmente per materiali e per geometria.

In seguito non verrà fatta una catalogazione dei vari plantari esistenti ma si è scelto di descrivere le sole tipologie con cui si è avuto a che fare in questo studio. Indipendentemente dalle tipologie, si sono andati a valutare gli effetti prodotti dall'utilizzo dei plantari prescritti dal medico analizzando gli spostamenti dei baricentri che si verificano condizioni statiche. Il piede infatti oltre ad essere il principale organo di moto è un importantissimo organo di senso che, grazie all'azione di particolari recettori, è responsabile del mantenimento della postura e dell'equilibrio.

4.2 Il plantare

Il plantare è un dispositivo medico che va interposto tra il piede e la superficie d'appoggio che solitamente rappresenta la suola della calzatura.

E' impiegato per svariati scopi tra i quali: il sostegno della volta plantare, la protezione del piede durante la deambulazione, la correzione della postura o il riequilibrio dell'arto riconducibili tutti ad un unico obiettivo: incrementare il benessere del paziente migliorando l'interfaccia uomo-ambiente.

I plantari attraverso la geometria ed i materiali con cui cono costruiti vanno ad agire direttamente su ciò che mette in relazione il nostro sistema dell'equilibrio con

l'ambiente esterno, essi agiscono cioè, a livello di esterocettori cutanei e propriocettivi. Quest'ultimi sono particolari recettori del sistema nervoso sensibili agli stimoli che si sviluppano all'esterno dell'organismo; la reazione a questi stimoli consente di modificare istantaneamente l'azione muscolare guidando il corpo in una postura più funzionale o ad un sistema più stabile ed equilibrato.
Risulta importante che la progettazione e la scelta dei materiali per la costruzione di tali sistemi debba essere quanto mai accurata; rilevante è anche l'impegno e l'attenzione del paziente che dovrà seguire le indicazioni prescritte dal medico rispettando periodi e modalità di utilizzo; i plantari andranno periodicamente controllati e modificati a seconda dei cambiamenti posturali in corso.

L'iter da eseguire per arrivare all'utilizzo di un plantare ortopedico si compone di vari passaggi. Punto di partenza è la prescrizione dell'utilizzo del plantare da parte del medico di competenza; egli dopo aver effettuato un'analisi completa del piede, solitamente con l'ausilio di una pedana baropodometrica, esegue la diagnosi e stabilisce se il plantare che si dovrà utilizzare sarà di tipo preconfezionato o su misura; egli inoltre fisserà un' iniziale modalità di utilizzo dei plantari (per quante ore indossarlo al giorno, su quale tipo di calzature) che andrà verificata dopo un periodo di circa un mese.

4.2.1. Il plantare preconfezionato

Questa tipologia di plantari viene solitamente prescritta in caso di disturbi che necessitano di effetti correttivi meno intensi di quelli prodotti dai plantari costruiti su misura. Il principale vantaggio dei plantari preconfezionati è quello di essere già pronti all'uso, inoltre la loro estrema leggerezza e lo spessore ridotto consentono l'inserimento in ogni tipologia di scarpa. Vengono usati per riparare il piede dagli eventuali traumi e per aumentare la stabilità durante lo svolgimento del passo. Per fare ciò sfruttano le proprietà di particolari materiali; le basi dei plantari costituiscono la struttura portante che dà forma al plantare le troviamo realizzate in EVA o in fibre composte.

Oltre ai plantari preconfezionati protettivi sono utilizzati anche plantari preconfezionati flebologici che grazie alla loro particolare struttura contribuiscono a migliorare la circolazione sanguigna e tutti i disturbi ad essa collegati. La volta ha la caratteristica di essere ad elasticità ripetuta essa cioè lavora ad ogni passo con effetto pompa su arterie e vene; la barra attiva i punti di riflessologia relativi al cuore e ai polmoni per favorire il naturale flusso e deflusso; anche il rivestimento a memoria rapida contribuisce al miglioramento della circolazione sanguigna.

Fig. 4.1 Immagine di un plantare preconfezionato Podartis di tipo Orthoactive

Plantari preconfezionati come quello mostrato in figura 4.1 sono tra i più utilizzati; si tratta di plantari protettivi con particolari proprietà stabilizzanti ed antistress**:** i materiali high tech di Orthoactive ammortizzano e proteggono oltre al piede, anche le ginocchia e la colonna.

4.2.2. Il plantare su misura

Nel caso in cui si verifichi la necessità di un plantare su misura si procedererà in un altro modo. Per prima cosa verrà presa l'impronta del piede da parte dei tecnici ortopedici che faranno appoggiare il piede che necessita di plantare su di un blocco di una particolare schiuma deformabile (podoschiuma) in situazione di carico.

Fig. 4.2 Presa dell'impronta del piede sotto carico su blocco di podoschiuma.

L'impronta così ottenuta servirà per creare un calco in gesso del piede, struttura su cui si baserà l'intera costruzione del plantare. Il medico al momento della prescrizione del plantare non fornisce nessun particolare parametro numerico e nessuna condizione sui materiali da utilizzare; starà all'esperienza del tecnico ortopedico la scelta della geometria e dei materiali da usare per creare il plantare.
Sia per quanto riguarda la geometria che il materiale la scelta viene effettuata tenendo bene a mente l'obiettivo per cui è stato prescritto il plantare; si possono raggruppare i motivi in due grandi filoni:

- La correzione o il sostegno
- La compensazione o la protezione

Si intende come **correttiva**, l'ortesi atta a correggere una determinata morfologia o problematica in età evolutiva ovvero fino a quando il sistema muscolo-scheletrico è in grado di rispondere alle sollecitazioni esterne. La geometria sarà di estrema importanza per modellare la pianta del piede nella posizione corretta senza però opprimerlo producendo ulteriori danni; questa particolare attenzione è da tenere soprattutto nel caso di plantari per bambini la cui pianta ha bisogno di corrette sollecitazione e non di costrizioni per potersi sviluppare correttamente. I materiali utilizzati saranno resistenti e non facilmente deformabili. Plantari di questo tipo vengono utilizzati in caso di piede piatto o retropiede valgo.

In particolare i plantari **biomeccanici** hanno lo scopo di ristabilire una corretta funzionalità del passo; sono molto complessi da realizzare e per raggiungere il loro scopo agiscono sostenendo e stimolando l'arco longitudinale in modo elastico e normalizzando eventuali ipercarichi su qualsiasi zona del piede.

I **plantari compensativi (o antalgici)** tendono a compensare e a diminuire il dolore provocato da varie patologie croniche. Attutisce, scarica gli urti in un determinato punto e distribuisce in maniera più omogenea la pressione sulla pianta del piede. Per fare ciò verranno utilizzati materiali morbidi e ammortizzanti Per quanto riguarda la geometria, invece si ricorrerà ad un soffice e avvolgente sostegno all'arco del piede. Questo tipo di plantare viene spesso prescritto ai pazienti con piede diabetico a causa delle dolorose ulcere che la malattia provoca.

La struttura del plantare dipenderà oltre che dalla funzionalità anche da numerosi altri fattori; di notevole influenza sono ad esempio l'età e il peso del paziente, l'attività sportiva svolta, la professione, il tipo di scarpa utilizzato, le caratteristiche della pelle come allergie o sudorazioni.
In base alle esigenze del paziente si sceglieranno le proprietà che dovrà possedere il plantare; per correggere, sostenere o stabilizzare si utilizzeranno materiali come il sughero, il cuoio e le resine composite termoformabili, mentre si impiegheranno schiume poliolefiniche a celle chiuse modellabili per riequilibrare gli eccessivi picchi di forze (dovute ad esempio al cedimento delle teste metatarsali). E' possibile anche costruire plantari le cui parti sono costituite da differenti materiali per poter beneficare di più proprietà contemporaneamente; per un soggetto diabetico in sovrappeso, ad esempio, si può pensare di creare un plantare con una base costituita di un materiale robusto e non deformabile capace di resistere alle forti sollecitazioni durante la deambulazione, ricoperto da un corpo di materiale particolarmente morbido capace di attutire gli urti e proteggere le lesioni provocate dal diabete.
E' consigliato infine apporre un rivestimento, per esempio di microfibra, per una questione di igiene, esso infatti limita l'insorgenza di micosi della pelle, e di protezione del tessuto sottocutaneo.

Caratteristiche	EVA	PPT	VI-POD	DIAPOD	DERMOPLUS
Compressione	24-50%	18%	22.5%	56%	-
Morbidezza	23-45	19	20	23	-
Durata/ Fragilità	Resistente 12/24 mesi	Fragile 4/6 mesi	Resistente 24 mesi	Resistente 24 mesi	Resistente 12/24 measi
Lavorabilità	Buona termoformabile	Limitata Non termoformabile	Buona termoformabile	Buona termoformabile	Discreta Non termoformabile
Dermo-compatibile	no	si	si	si	si
Batteriostatico	no	no	si	si	si
Fungicida	no	no	si	si	si

Tab. 4.1 Comparazione delle principali caratteristiche di 5 materiali usati nella costruzione dei plantari ortopedici.

4.3. Valutazione dell'influenza del plantare in condizioni statiche

Al fine di rilevare cosa comporta l'impiego di un plantare in condizioni statiche è doveroso fare delle iniziali considerazion. La principale difficoltà consiste nel confronto di distribuzioni pressorie per il medesimo soggetto ma in condizioni diverese: scalzo e con calzatura e plantare. Sotto questo aspetto l'influenza della calzatura è notevole: la struttura e la composizione della suola giocano un ruolo fondamentale in condizioni statiche nella distribuzione dei carichi e delle pressioni; tuttavia il confronto tra le distribuzioni pressorie può essere considerato come integrazione di un ulteriore studio più approfondito per valutare, ad esempio, in modo qualitativo le posizioni delle zone a massima pressione che in condizione eretta statica dovrebbero trovarsi centralmente nel retropiede (Avagnina et al.2003).

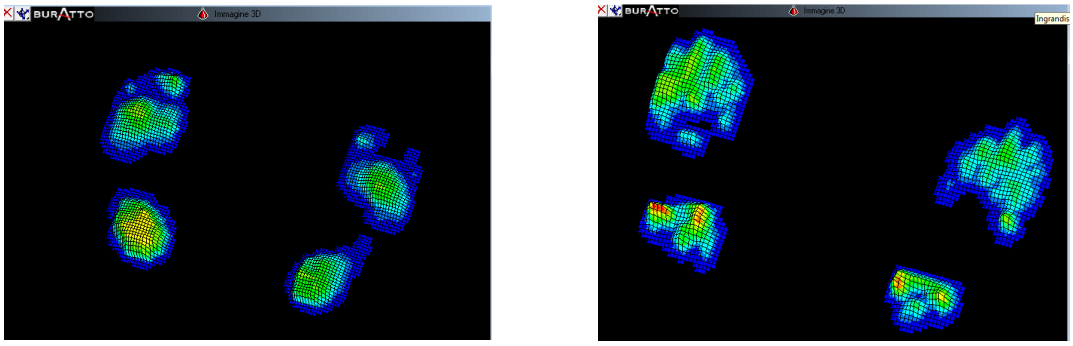


Fig. 4.1 Distribuzione pressoria in condizione statica scalzo e con scarpa e plantare

Per valutare l'effetto prodotto dall'utilizzo del plantare si è deciso, perciò, di prestare maggior attenzione allo studio stabilometrico che la pedana baropodometrica a nostra disposizione è in grado di effettuare. Esso permette di misurare le oscillazioni posturali in posizione eretta. L'analisi stabilomentrica esamina la capacità di mantenimento della postura evidenziando eventuali problemi di equilibrio del soggetto dovuti sia a lesioni di tipo strutturale sia a lesioni di componenti del sistema nervoso responsabili del mantenimento della postura e dell'equilibrio.

La postura eretta è un sistema biomeccanicamente instabile, continuamente sottoposta agli effetti della forza di gravità e degli eventuali agenti perturbatori, che l'uomo cerca di mantenere grazie al sistema di regolazione dell' equilibrio molto fine ed efficace di cui dispone. Il mantenimento della stazione eretta, anche in condizione di quiete, implica continui aggiustamenti posturali dei segmenti corporei(testa, tronco, arti) rispetto alla direzione verticale. Come ogni movimento, seppur piccolo, anche il movimento posturale avviene per l'azione di un sistema di forze e momenti che ha l'obiettivo di portare i segmenti corporei ad una condizione di equilibrio dinamico, continuamente perturbata da effetti interni come i movimenti di respirazione o esterni.

In condizioni fisiologiche la postura eretta è regolata da un sistema di controllo che organizza dinamicamente l'equilibrio e che dipende da tre fattori:

- Il sistema sensoriale: il sistema visivo, vestibolare e somatosensoriale forniscono informazioni utili alla localizzazione del corpo nel suo insieme e dei suoi segmenti

- Il sistema nervoso centrale(SNC): decodifica ed integra le informazioni provenienti dal sistema sensoriale e genera sequenze adeguate di attivazioni muscolari, assecondando eventuali componenti cognitive e volontarie.
- Gli attuatori muscolari e neuro articolari: eseguono i comandi centrali ed i riflessi mettendo in atto quei movimenti compensatori e/o anticipatori che consentono di stare in equilibrio.

Tutti le oscillazioni posturali verificatesi in stazione eretta vengono rilevate dalla pedana e riportate complessivamente sotto la forma di gomitolo dei baricentri in un grafico che prende il nome di statokinesiogramma; lo strumento inoltre restituisce i grafici degli andamenti delle oscillazioni laterali e antero-posteriori dei baricentri nel tempo.

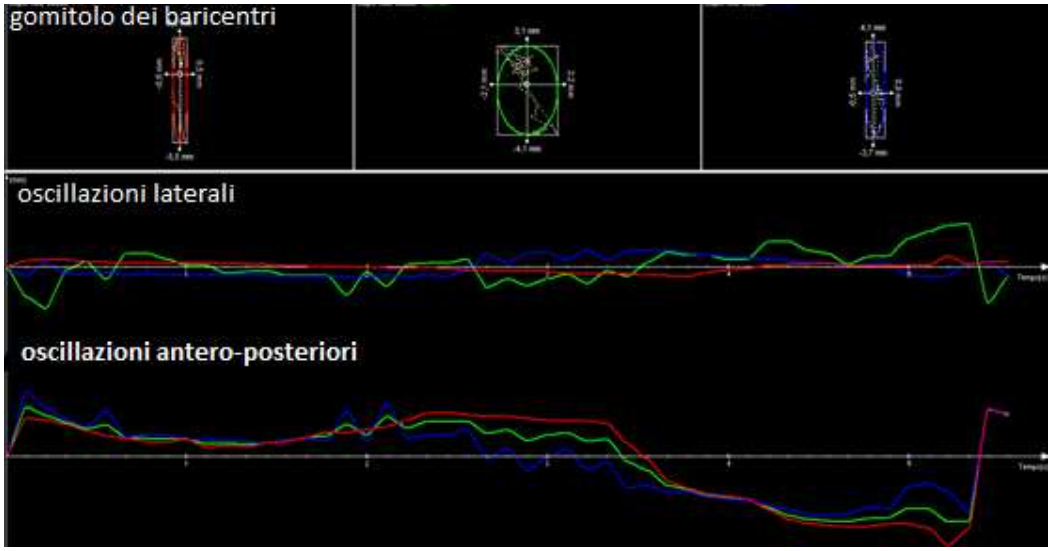


Fig.4.4 Immagine della schermata complessiva dello studio stabilometrico

Lo studio stabilometrico fornito dalla pedana si divide in tre diverse parti:

- Il gomitolo dei baricentri che rappresenta lo spostamento dei baricentri durante l'analisi, rispetto ai relativi baricentri medi; i baricentri presi come riferimento sono il baricentro del piede sinistro, il baricentro del piede destro, il baricentro corporeo. Dal gomitolo dei baricentri è possibile ricavare il valore dell'area dell'ellisse che contiene, con il 95% di probabilità, le varie posizioni del

baricentro. Questo parametro esprime l'efficacia che ha il sistema posturale a mantenere il centro di gravità vicino alla sua posizione di equilibrio: ad una limitata area dell'ellisse sarà associata una buona capacità di mantenimento dell'equilibrio(postura).

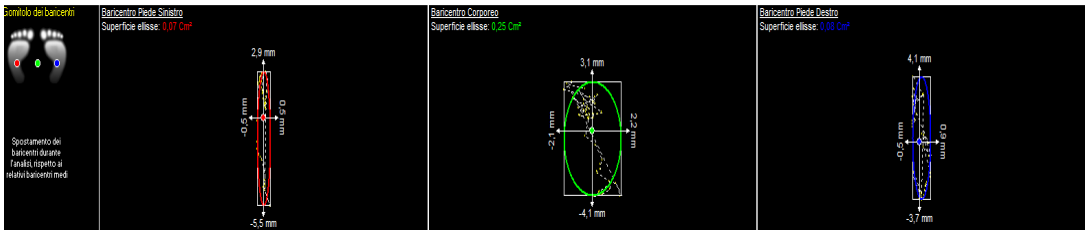


Fig. 4.5 Immagine dei gomitoli dei baricentri

I movimenti laterali(direzione destra-sinistra) vengono rappresentati sull'asse delle ascisse mentre i movimenti antero-posteriori(avanti-indietro) sull'asse delle ordinate; seguendo questa convenzione vengono forniti:

- Il valore minimo dello spostamento laterale del baricentro come espressione del massimo spostamento verso sinistra dello stesso.
- Il valore massimo dello spostamento laterale del baricentro come espressione del massimo spostamento verso destra dello stesso.
- Il valore minimo dello spostamento frontale del baricentro come espressione del massimo spostamento longitudinale dello stesso.
- Il valore massimo dello spostamento frontale del baricentro come espressione del massimo spostamento longitudinale dello stesso.

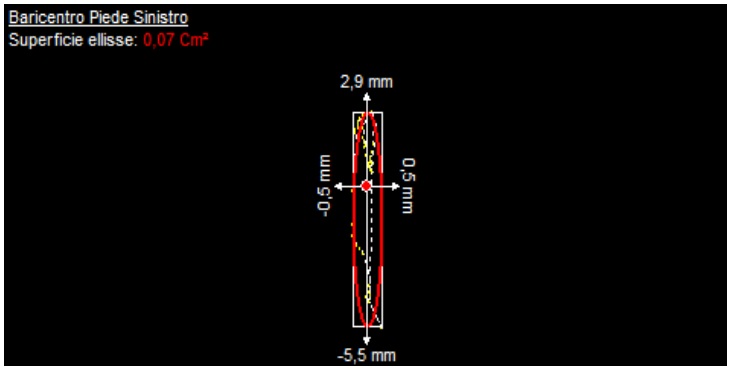


Fig. 4.6. Esempio di gomitolo riferito al baricentro del piede sinistro con vari valori forniti(massimi spostamenti laterali, massimi spostamenti frontali (mm))

- Oscillazioni laterali e antero-posteriori dei baricentri: vengono visualizzate in un grafico avente nell'asse delle ascisse il tempo misurato in secondi e nell'asse delle ordinate i valori degli spostamenti dei baricentri rispetto ai baricentri di riferimento.

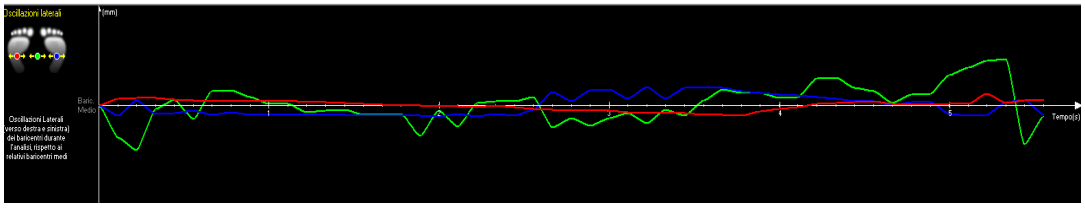


Fig. 4.7 Esempio di grafico degli andamenti laterali dei baricentri

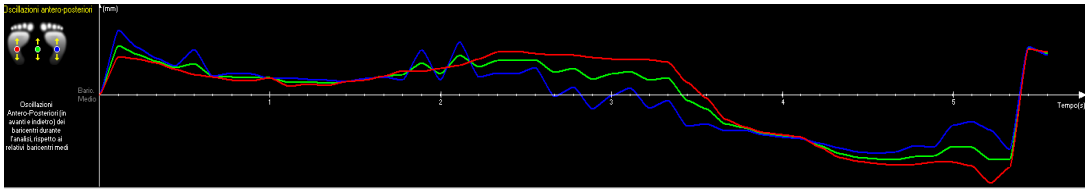


Fig. 4.8 Esempio di grafico degli andamenti antero-posteriori dei baricentri

I dati rilevati dallo studio stabilometrico sono stati elaborati con l'obiettivo di ricavare un unico parametro in grado di rappresentare la stabilità del soggetto in esame; il rapporto tra le oscillazioni laterali e le oscillazioni antero-posteriori verificate durante l'analisi statica esprimono con un unico valore numerico la forma del gomitolo dei baricentri; questo parametro è chiamato fattore di forma e corrisponde all'eccentricità dell'ellisse che contiene lo statokinesiogramma. Questo rapporto permette di effettuare dei confronti tra le oscillazioni dei baricentri di differenti pazienti; il rapporto di forma, infatti, è indipendente dalle caratteristiche strutturali, come l'altezza, che intervengono direttamente nel mantenimento della postura proprie del soggetto e ciò ci permette di effettuare delle operazioni di comparazione e media. Dallo studio stabilometrico effettuato sul gruppo di soggetti sottoposto all'analisi si sono calcolati i valori dei rapporti di forma utilizzando i valori rilevati dalle prove eseguite con piede scalzo e indossando il plantare.

	o laterali (mm)		o antero-post (mm)		o laterali (mm)	o antero-pos (mm)	FATTORE DI FORMA
	min	max	min	max	(mm)	(mm)	
piede cavo							
1	-2,3	2,2	-1,9	3,7	4,5	5,6	0,8
2	-1	1,1	-2,5	2,1	2,1	4,6	0,5
6	-1,6	1,5	-1,7	4	3,1	5,7	0,5
18	-3	5,3	-2	1,7	8,3	3,7	2,2
piede piatto							**1,0(0,8)**
3	-2,8	4,1	-3,6	2,4	6,9	6	1,2
4	-3,1	4,4	-2,5	2,5	7,5	5	1,5
10	-3,2	1,6	-5,1	5,1	4,8	10,2	0,5
13	-4,9	4,3	-4	3,8	9,2	7,8	1,2
15	-5,5	9,1	-8,9	5,7	14,6	14,6	1,0
16	-5,2	4,4	-4,3	3,5	9,6	7,8	1,2
19	-3	2,8	-5	2,8	5,8	7,8	0,7
altro							**1,0(0,3)**
5	-1,9	1,6	-1	1	3,5	2	1,8
7	-2,3	1,7	-2,1	2,3	4	4,4	0,9
8	-5	4,7	-2,7	3,1	9,7	5,8	1,7
9	-0,9	1	-1	0,8	1,9	1,8	1,1
11	-0,5	1,3	-1,4	2,4	1,8	3,8	0,5
12	-3,3	3,3	-1,6	1,2	6,6	2,8	2,4
14	-2	1,4	-1,9	3,1	3,4	5	0,7
17	-1,6	2,4	-1,8	2,8	4	4,6	0,9
20	-5,3	7,7	-10,4	6,9	13	17,3	0,8
							1,2(0,6)

Tab 4.2 Tabella dei fattori di forma per le prove eseguite senza plantare

	o laterali (mm)		o antero-post (mm)		o. laterali	o.antero-pos	FATTORE DI FORMA
	min	max	min	max	(mm)	(mm)	
piede cavo							
1	-2,1	1	-4,3	2,7	3,1	7	0,4
2	-4,4	3,6	-3,2	2,7	8	5,9	1,4
6	-2,9	2,2	-5,5	10,4	5,1	15,9	0,3
18	-10,7	7,9	-8,2	7,7	18,6	15,9	1,2
							0,8(0,5)

piede piatto							
3	-3,9	5,1	-6,5	2,9	9	9,4	1,0
4	-1,1	1,1	-2,9	3,3	2,2	6,2	0,4
10	-3,1	1,8	-12	5,3	4,9	17,3	0,3
13	-1,7	3,6	-4,2	8,6	5,3	12,8	0,4
15	-4,7	4,4	-3,1	5,4	9,1	8,5	1,1
16	-7,1	8,7	-8,8	5,9	15,8	14,7	1,1
19	-3,8	4,1	-9,7	7,6	7,9	17,3	0,5
altro							**0,7(0,4)**
5	-1,3	1,8	-3,6	5,5	3,1	9,1	0,3
7	-2,3	1,6	-2,8	3,8	3,9	6,6	0,6
8	-4,5	1,4	-5,8	5,2	5,9	11	0,5
9	-2,8	4,7	-1,8	1,4	7,5	3,2	2,3
11	-4,8	2,2	-8,5	3,3	7	11,8	0,6
12	-11,2	6,9	-7,6	11,6	18,1	19,2	0,9
14	-1,9	2,1	-1,2	2,1	4	3,3	1,2
17	-8,2	10,7	-15,7	15	18,9	30,7	0,6
20	-2,1	1,5	-5	3	3,6	8	0,5
							0,8(0,6)

Tab 4.3 Tabella dei fattori di forma per le prove eseguite con plantare;

La media dei fattori di forma calcolata utilizzando il plantare è minore della media dei fattori di forma calcolata su prove senza plantare in tutte e tre le conformazioni del piede considerate; in generale l'utilizzo del plantare abbassa il valore del fattore di forma portandolo ad avvicinarsi al valore di 0.5, considerato il valore in cui si verifica la condizione di massima stabilità.

L'effetto dell'uso dei plantari è ancora visibile osservando l'andamento del grafico che rappresenta le oscillazioni laterali e antero-posteriori del baricentro del piede destro, del piede sinistro e del corpo. Confrontando i grafici ottenuti effettuando l'analisi senza l'uso del plantare con i grafici attenuti utilizzando il plantare possiamo osservare, per quasi la totalità dei soggetti considerati, una notevole diminuzione di picchi e un andamento più regolare delle curve come avviene in figura 4.9 e 4.10.

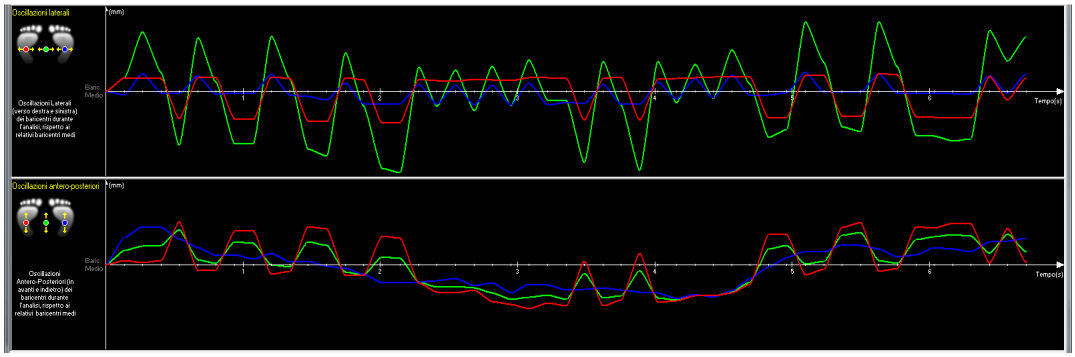


Fig. 4.9 Andamento delle curve senza l'utilizzo del plantare

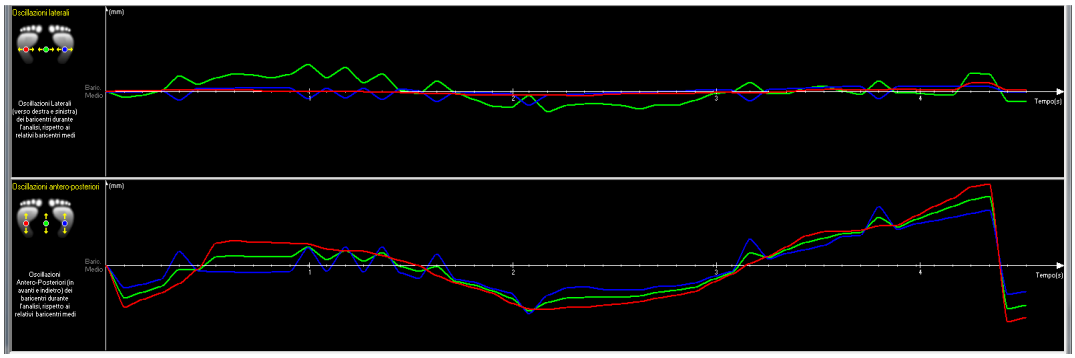


Fig. 4.10 Andamento delle curve con l'utilizzo del plantare

CAPITOLO 5

Influenza del plantare sull'andamento del centro di pressione durante il passo

5.1 Introduzione

In una giornata si compiono in media circa 10-15,000 cicli del passo completi. E' importante osservare come ogni variazione, in questo caso l'utilizzo di un plantare, vada ad influenzare i parametri più significativi della deambulazione.

In questo studio è stato scelto di analizzare le variazioni dell'andamento del centro pressorio durante le varie fasi del passo per le due diverse conformazioni maggiormente riscontrate nel gruppo di soggetti considerato: il piede piatto ed il piede cavo. Allo scopo di effettuare un confronto tra i due casi oltre che qualitativo anche quantitativo, ci si è serviti di una particolare metodo che verrà in seguito descritto.

5.2 Descrizione del passo e delle sue fasi

La deambulazione (marcia o cammino) dell'uomo consiste in una sequenza ripetitiva di movimenti degli arti al fine di far avanzare il corpo mantenendo contemporaneamente la stabilità dell'appoggio.; è' un'azione complessa risultante delle interazioni fra forze interne ed esterne coordinate dal sistema di controllo posturale e dell'equilibrio.

Durante l'avanzamento del corpo, un arto funge da sostegno, mentre l'altro avanza fino al successivo appoggio; successivamente mentre entrambi i piedi sono in contatto con il terreno avviene il trasferimento del peso del corpo da un arto all'altro ed il piede che fungeva da sostegno avanza sorretto dall'altro arto. Una singola sequenza di azioni di un arto è definita come ciclo del passo ("gait cycle"). Dal momento che un'azione confluisce direttamente nella successiva, è difficile stabilire uno specifico evento di

inizio e di fine del ciclo; poiché il momento di contatto con il suolo rappresenta l'evento più facile da definire, il ciclo del passo viene anche definito come quella sequenza di azioni dell'arto compreso fra i due appoggi calcaneari dello stesso piede.

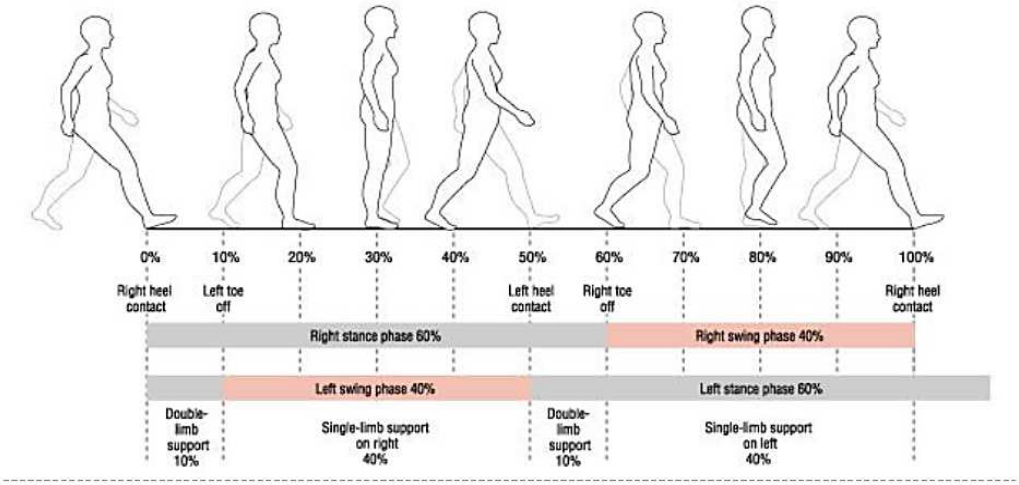


Fig. 5.1 Suddivisione in fasi del ciclo del passo.

Ogni ciclo è costituito da un periodo d'appoggio o stance phase che occupa circa il 60% del ciclo del passo, durante il quale il piede è in contatto con il terreno, e da un periodo di oscillazione o swing phase che occupa il 40% del ciclo completo del passo e si riferisce al tempo in cui il piede si trova sollevato per l'avanzamento dell'arto.

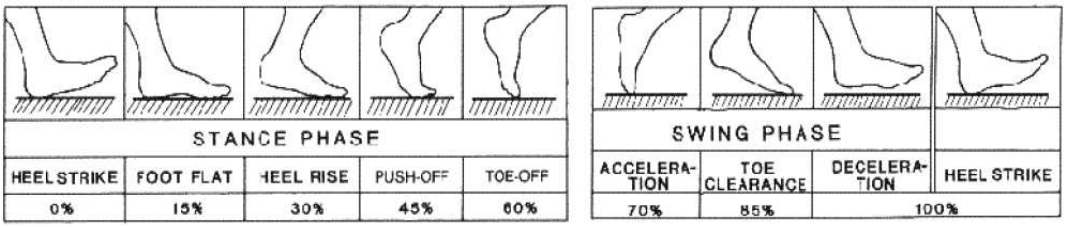


Fig. 5.2 Suddivisione in sotto-fasi del ciclo del passo.

Il periodo d'appoggio, basandosi sull'osservazione della reciproca posizione dei due piedi, può essere suddivisa a sua volta in tre sotto periodi:
il periodo di doppio appoggio iniziale in cui entrambi i piedi si trovano a contatto con il suolo e costituisce l'inizio del ciclo del passo, il periodo di appoggio singolo che ha inizio quando il piede opposto si stacca per l'oscillazione e il periodo di doppio

appoggio terminale che ha inizio con il contatto iniziale del piede controlaterale e continua finché l'arto che era in appoggio inizialmente si distacca per l'oscillazione.

Appoggio	60%	
Doppio appoggio iniziale		10%
Appoggio singolo		40%
Doppio appoggio finale		10%
Oscillazione	40%	

Tab 5.1 Percentuali della durata delle varie fasi di un ciclo del passo in rapporto alla durata di un ciclo del passo completo

Infine è importante precisare anche il concetto di semipasso: esso è definito come quella sequenza di azioni di un arto che riporta il piede controlaterale nella posizione corrispondente alla posizione di partenza; spesso accade di usare indistintamente il termine di passo e semipasso.

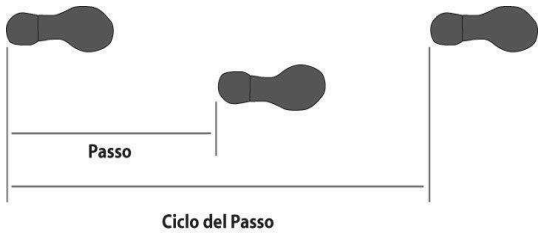


Fig. 5.3 Schematizzazione passo e semipasso

Le fasi del passo

L'analisi della marcia è complessa in quanto quest'ultima avviene contemporaneamente rispetto ai tre piani dello spazio (piano frontale, trasversale, sagittale); per facilitare quest'analisi si è pensato di studiare la marcia separatamente arto per arto e fase per fase.

Considerando l'azione di un solo arto durante un ciclo del passo, osserviamo che nella fase di appoggio il piede svolge due funzioni essenziali: riceve il peso corporeo e lo trasferisce all'arto controlaterale permettendo al corpo di procedere in avanti.

Inizialmente il piede deve assorbire l'onda di shock provocata dalla ricezione del peso corporeo; avverrà un rallentamento dei movimenti dell'arto inferiore e un rilassamento delle articolazioni in modo da permettere l'adattamento del piede al terreno dopo l'atterraggio del tallone. Successivamente il piede dovrà irrigidire le strutture articolari per permettere ai muscoli flessori di sospingere il peso corporeo in avanti.
Il periodo di appoggio si può dividere in tre diverse fasi:

- La fase di contatto iniziale initial contact
- La fase di appoggio o midstance
- La fase di propulsione o push off

La fase di contatto iniziale o initial contact

La fase di contatto è una fase molto breve: ha una durata di circa il 27% del periodo di appoggio; inizia con il contatto del tallone con il suolo (hell strike) che genera una brusca e momentanea forza di reazione verticale, dal momento che si verifica una caduta libera del corpo di circa 1cm. Successivamente si ha il rotolamento del calcagno, il trasferimento del peso del corpo sull'arto in appoggio che avvicina l'avampiede al suolo. Le condizioni usuali in cui si verifica il contatto iniziale sono le seguenti:

- Anca flessa a circa 30°
- Ginocchio flesso a circa 5°
- Caviglia dorsiflessa

Queste condizioni contribuiscono all'assorbimento delle forze d'urto durante il passo mantenendo la stabilità necessaria per la sicurezza del carico.

Fig. 5.4 Posizione dell'arto durante la fase di contatto iniziale

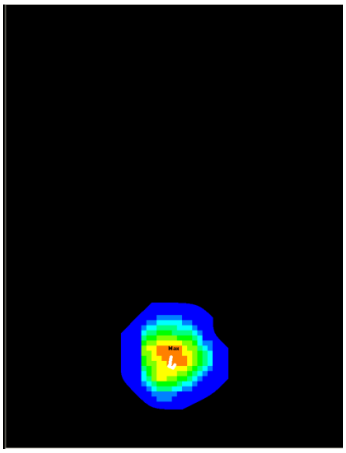


Fig. 5.5 Distribuzione pressoria durante la fase di contatto iniziale

La fase di appoggio o midstance

La fase di appoggio ha una durata del 40% del periodo di appoggio; inizia con il fore foot load in cui si ha il carico dell'avampiede e termina con il distacco del calcagno (heel lift).

Il distacco del piede contro laterale per l'oscillazione determina l'inizio dell'appoggio singolo per l'arto a contatto con il suolo. Questo continua fino a quando il piede contro laterale non entra nuovamente a contatto con il terreno. Man mano che l'arto ruota in avanti sul piede d'appoggio avviene un trasferimento del carico dal retropiede all'avampiede. In questa fase del passo il piede genera una forza di reazione verticale

che è strettamente dipendente dalla struttura degli archi plantare che costituiscono il piede; essi infatti come una vera e propria struttura architettonica sono responsabili dello scarico a terra del peso corporeo. Alterazioni alla struttura degli archi plantari ed in particolare all'arco interno vengono riscontrate durante l'esecuzione della fase di midstance del passo.

Le condizioni usuali, che assicurano la progressione del corpo sul piede in appoggio e la stabilità dell'arco e del tronco, tipiche della fase d'appoggio sono le seguenti:

- Tibio tarsica dorsiflexa di circa 10°
- Sottoastragalica in posizione neutrale

Fig. 5.6 Posizione dell'arto durante la fase di midstance

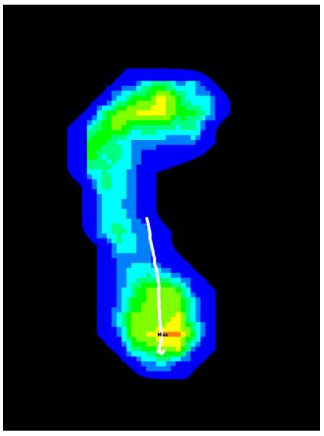


Fig. 5.7 Distribuzione pressoria durante la fase di midstance

La fase di propulsione o push off

La fase di propulsione ha una durata di circa il 33% del periodo di appoggio; ha inizio con il rialzo del calcagno(heel lift) e termina con il distacco delle dita(toe off).

Il trasferimento del carico avviene dal lato esterno a quello interno in modo più o meno accentuato in base alla conformazione del piede che esegue il passo;

le condizioni usuali in cui si verifica la fase di propulsione sono le seguenti:

- Sottoastragalica supinata
- Arto extraruotato

Fig. 5.8 Posizione dell'arto nella fase di push off

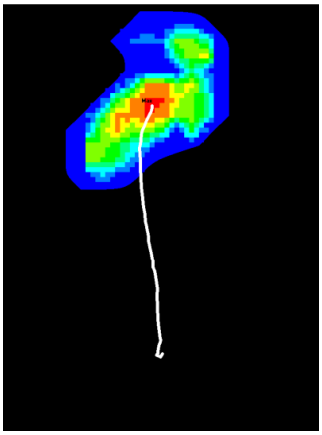


Fig. 5.9 Distribuzione pressoria durante la fase di push-off

Dopo aver analizzato in dettaglio il comportamento del piede e delle sue componenti in corrispondenza delle varie fasi del passo, ricerchiamo, grazie all'analisi svolta dalla pedana in condizione dinamica, un parametro che rappresenti la modalità di svolgimento del passo. Il parametro scelto è l'andamento del centro di pressione durante il passo.

5.3 Il centro di pressione CoP

Il centro di pressione, indicato comunemente con CoP dall'acronimo inglese Centre of Pressure, è il punto di applicazione della risultante(chiamata forza di reazione al suolo) delle forze scambiate tra piede e terreno. Si tratta, cioè, del centroide delle pressioni applicate da ogni punto della superficie del piede in contatto con la base di appoggio.

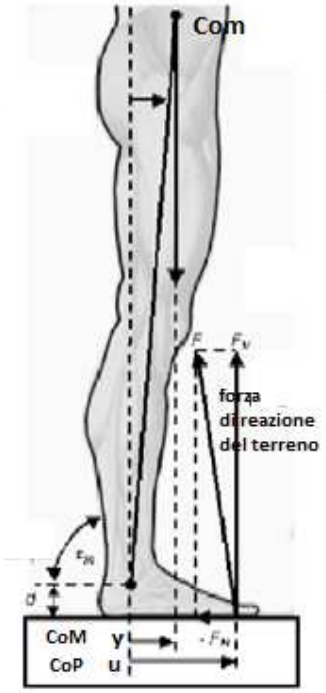


Fig. 5.10 Immagine del CoP e del CoM e delle rispettive posizioni

In figura 5.10 la posizione del centro di pressione è indicata con u mentre la posizione della proiezione del centro di massa(CoM) sulla superficie di appoggio è indicata con y. Il centro di massa o baricentro è il punto in cui si può immaginare concentrata tutta la massa del corpo: è il centroide dei i segmenti corporei. CoP e proiezione del CoM sono

due diversi punti che descrivono la postura e la deambulazione di un soggetto; anche se in alcune situazioni si trovano a coincidere, essi non devono essere confusi.

In stazione eretta in condizione statica, ad esempio, se CoP e CoM sono allineati e il CoP si trova nella superficie di appoggio del corpo, significa che ci troviamo in condizione di equilibrio. Durante il cammino, invece, la posizione del centro di pressione si sposta istante per istante. Considerando la proiezione dell'andamento del centro di pressione su una superficie orizzontale otteniamo una curva denominata linea del passo.

5.3.1 L'andamento del CoP durante il passo

Landamento del centro pressorio è rilevato direttamente dalla pedana baropodometrica che fornisce le cordinate(cm) del centro pressorio nei vari istanti di rilevamento durante tutta la fase di appoggio del passo.

In condizioni ideali, per un soggetto adulto la curva ottenuta sarà simile a quella di figura 5.11.

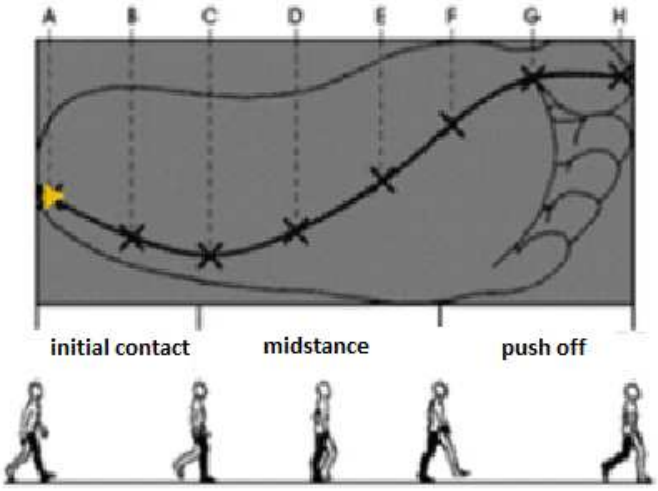


Fig. 5.11 Andamento ideale dei centri di pressione in corrispondenza delle varie fasi del passo

La posizione iniziale del CoP, dopo l'istante di heel strike, si trova nella parte centrale del calcagno, successivamente grazie all'azione dei muscoli planta-flessori che

permettono l'evoluzione del passo, l'andamento del centro di pressione procede in modo regolare lungo la direzione longitudinale del piede prima aprendosi nella zona laterale del piede ed in seguito richiudendosi verso la zona mediale della superficie plantare. Successivamente vi è il passaggio tra la 2° e 3° testa metatarsale e la curvatura verso il primo dito. In una deambulazione corretta la curva si presenta con andamento simile a quello appena descritto senza oscillazioni rilevanti. Se ciò non si verifica le anomalie nell'andamento del centro pressorio corrisponderanno a disturbi della deambulazione legati ad una determinata conformazione del piede.

In seguito verranno messi a confronto l'andamento del centro pressorio di un piede piatto e quello di un piede cavo.

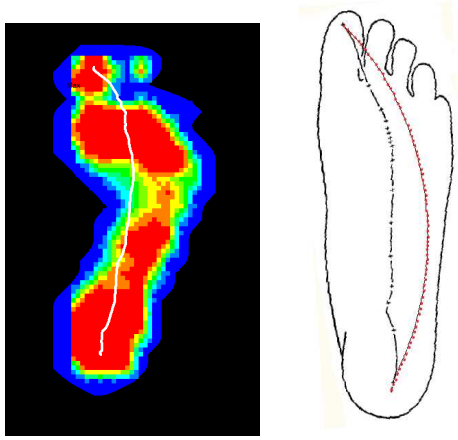


Fig. 5.12 Distribuzione pressoria e andamento del centro di pressione per un piede piatto.

Fig. 5.13 Distribuzione pressoria e andamento del centro di pressione per un piede cavo.

L'andamento del centro pressorio del piede affetto da piattismo ha un andamento simile alla forma di un arco: partendo dal calcagno procede fino all'alluce con una curvatura costante; dalla figura 5.15 b) si può notare che l'andamento del centro pressorio in esame è medializzato rispetto all'andamento ideale. L'abbassamento dell'arco plantare non permette il corretto rullaggio del piede per questo motivo l'andamento del centro pressorio sarà medializzato. Inoltre il mancato rullaggio fa sì che il piede poggi a terra tutto nello stesso istante conferendo la curvatura omogenee senza discontinuità;
L'andamento del centro di pressione per un piede cavo, invece, presenta una curvatura caratteristica in corrispondenza dell'avampiede dovuta essenzialmente all'aumento del carico sull'avampiede prodotto da una conformazione del piede che presenta un'eccessiva concavità del piede.

5.4 Influenza del plantare sull'andamento del CoP durante il passo

Per poter quantificare l'effetto dell'utilizzo del plantare nelle due diverse conformazioni del piede considerate, e quindi poter rendere dei valori numerici che facilitano un confronto, è stato elaborato un metodo che si è servito dell'ausilio di AutoCad, un software di progettazione grafica.
Per prima è stato creato un file Autocad contenente la riproduzione della superficie dei sensori attivi della pedana baropodometrica utilizzata durante le analisi su una griglia avente 48 divisioni lungo l'asse indicato con y e 53 divisioni lungo l'asse x. Questa quadrettatura ha costituito il sistema di riferimento di ogni confronto effettuato: tutti gli andamenti dei centri pressori considerati sono stati valutati in relazione alla griglia costruita.

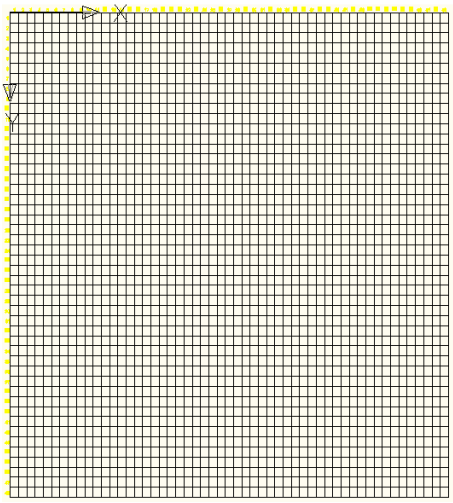


Fig. 5.14 Griglia di riferimento per la valutazione dell'andamento del centro pressorio

Con appositi strumenti messi a disposizione dal software è possibile tracciare sulla griglia, inserendo manualmente le coordinate del centro pressorio istante per istante, l'andamento del centro pressorio di un piede durante la deambulazione.

Inoltre, per facilitae l'individuazione dell'orientamento del passo durante la deambulazione, è stata tratteggiata la superficie dei quadretti della griglia corrispondenti ai sensori attivati durante il passo effettuato.

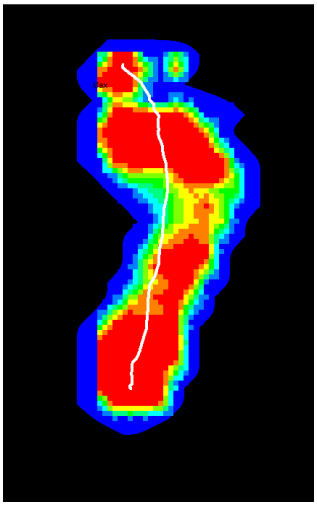


Fig. 5.15 Immagine di un passo con piede destro ottenuta dall'analisi dinamica.

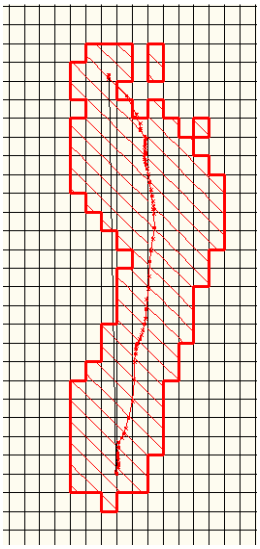


Fig. 5.16 Andamento del centro di pressione e area dei sensori attivi tratteggiata riportati sulla griglia di riferimento e corrispondenti all'analisi di figura 5.16

Viene riprodotto sulla medesima griglia il passo dello stesso soggetto che è stato effettuato con piede scalzo e con piede che indossa la calzatura ed il plantare.

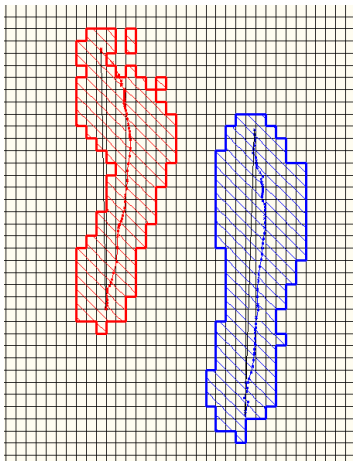


Fig. 5.17 Griglia con centro di pressione del piede destro scalzo(in rosso) e con l'ausilio del plantare(in blu)

Successivamente si sono tracciate delle rette di riferimento per rappresentare la direzione con cui è stato eseguito il passo sulla pedana; per convenzione si è scelto di considerare le rette passanti per il primo e l'ultimo punto dell'andamento del centro

pressorio in entrambi i passi. Per rendere l'analisi indipendente dalla direzione con cui è stato eseguito il passo, si effettua una rotazione di uno dei due andamenti del centro pressorio in modo da rendere parallele le rette di riferimento che individuano le direzioni dei passi.

Nel caso in esame si è scelto di ruotare l'andamento del centro pressorio del passo eseguito con il plantare. Si è effettuata una rotazione con centro di rotazione nel punto(31.54; 39.30) che corrisponde all'estremo inferiore del segmento di direzione e quindi al primo punto dell'andamento del centro pressorio; e con angolo di rotazione di ampiezza 2.85° ottenuta sottraendo l'ampiezza dell'angolo che individua l'inclinazione rispetto l'orizzontale della retta che individua la direzione del passo con piede scalzo(91.02°) e l'inclinazione della retta del passo con plantare(88.17°).

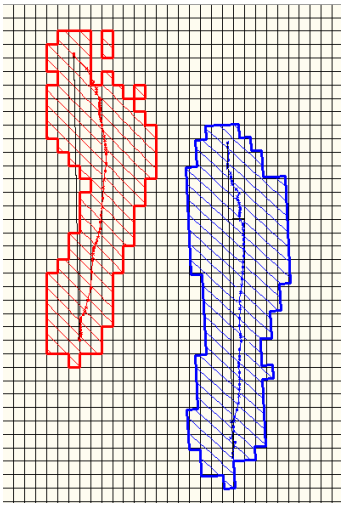


Fig. 5.18 Griglia con andamenti del centro di pressione orientati nella stessa direzione; le rette che ne individuano la direzione sono infatti paralleli.

Infine si sono rilevate le distanze di ogni punto di entrambi gli andamenti dalle corrispettive rette di riferimento. Si sono riportati su dei grafici temporali i valori rilevati; in particolare è stato riportato sull'asse delle ordinate il valore della distanza del centro di pressione dalla retta in corrispondenza dell'istante in cui quel determinato centro di pressione è stato rilevato. L'asse temporale considerato è stato espresso come percentuale rispetto al periodo di appoggio del passo; esso, come già detto

precedentemente, corrisponde al 60% dell'intero ciclo del passo. In questo modo l'individuazione dei valori delle distanze nelle corrispondenti fasi dell'appoggio del passo risulta facilitata. Le fasi considerate sono la fase di contatto iniziale o initial contact, la fase di appoggio o midstance e la fase di propulsione o push off.

Nel medesimo grafico si sono riportate le distanze relative al passo eseguito con piede scalzo(in rosso) e con passo eseguito con plantare(in blu).

Nel seguito vengono analizzati i grafici ottenuti dal metodo appena esposto il caso di un piede piatto ed il caso di un piede cavo.

In figura 5.19 sono riportati gli andamenti dei centri di pressione del piede piatto e del piede cavo che si sono scelti di analizzare caso in cui il passo sia stato eseguito con piede scalzo(rosso) o con scarpa e plantare(blu). Si noti l'andamento ad arco medializato del piede piatto, la curva corrispondente al sovraccarico e la terminazione sulle teste metatarsali del piede cavo descritti nel paragrafo 5.3.1.. L'andamento del centro pressorio ottenuto indossando la scarpa ed il plantare, indipendentemente dalla conformazione del piede, tende a linearizzarsi: l'effetto contenitivo della calzatura e l'azione di sostegno del plantare costringono l'andamento del centro pressorio ad una retta che attraversa nella parte centrale l'intero piede.

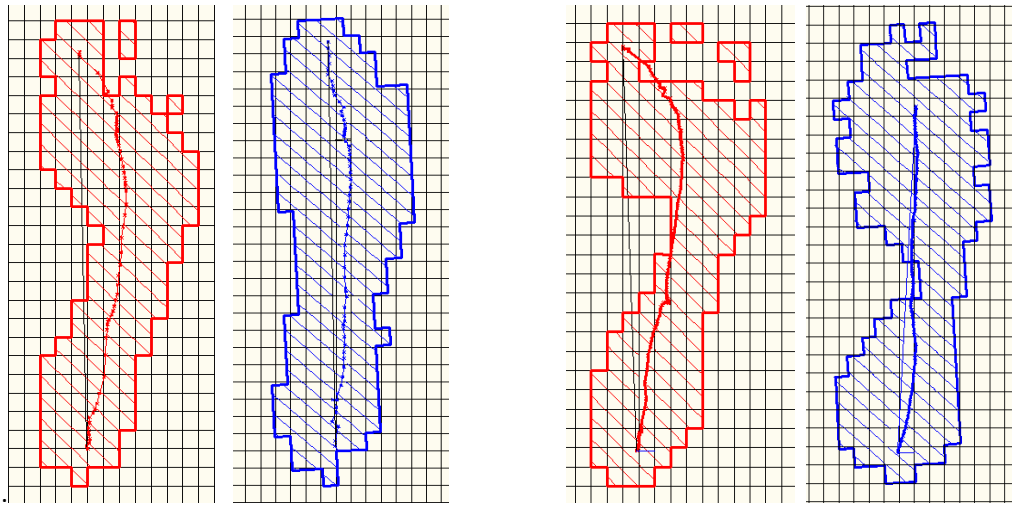


Fig. 5.19 Rappresentazione sulla griglia di riferimento del passo effettuato dal soggetto con piede piatto (a sinistra) e dal soggetto con piede cavo(a destra)

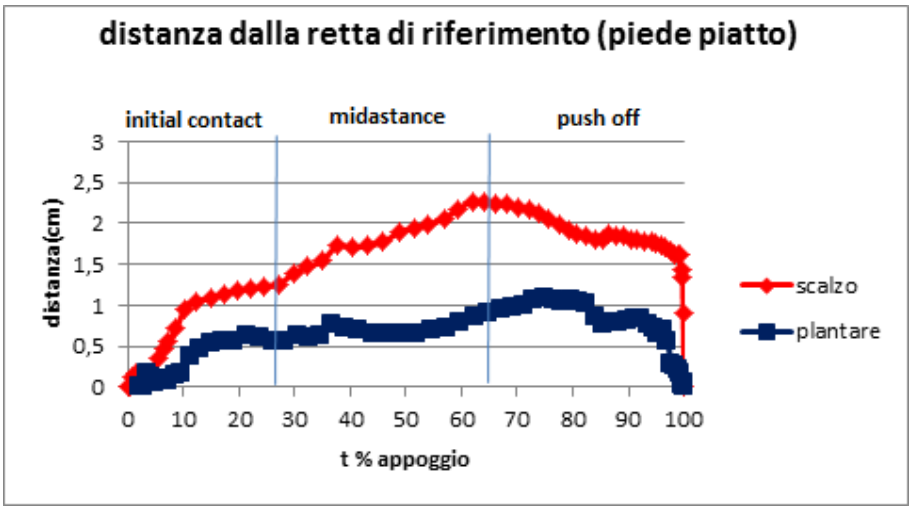


Fig. 5.20 Grafico delle distanze dei centri di pressione dalla retta di riferimento durante il periodo di appoggio per un piede affetto da piattismo. L'andamento in rosso è riferito al passo eseguito con piede scalzo mentre l'andamento in blu è riferito al passo eseguito con scarpa e plantare.

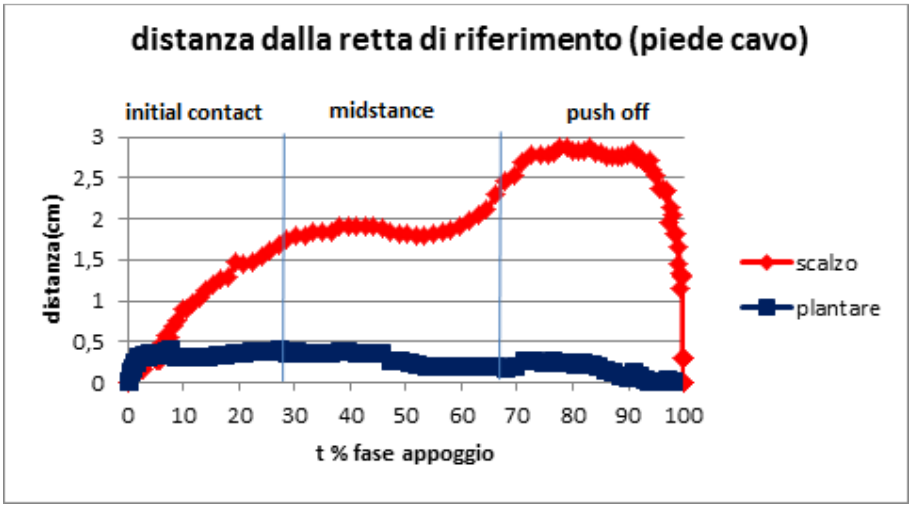


Fig. 5.21 Grafico delle distanze dei centri di pressione dalla retta di riferimento durante il periodo di appoggio per un piede affetto da cavismo. L'andamento in rosso è riferito al passo eseguito con piede scalzo mentre l'andamento in blu è riferito al passo eseguito con scarpa e plantare.

Per valutare l'effetto provocato dall'utilizzo del plantare e quantificarlo con dei valori si è considerata la differenza tra l'area sottesa dalla curva riferita al passo con piede scalzo e l'area sottesa dalla curva riferita al passo eseguito utilizzando il plantare. In particolare si sono ricavate le variazioni percentuali adattando a cento il rapporto tra i valori delle

differenze tra le aree con l'area massima sottesa dalla curva con piede scalzo. Le variazioni percentuali sono state calcolate per tutte le fasi di appoggio del passo ottenendo i valori riportati in Tabella 5.2. L'area sottesa dai grafici è stata calcolata con l'ausilio di Autocad.

	variazione %		
	initial contact	midstance	push off
piede piatto	53	**63**	43
piede cavo	64	86	**95**

Tab. 5.2 valori delle variazioni apportate dal plantare nelle diverse fasi dell'appoggio(initial contact, midstance, push off) per il piede piatto ed il piede cavo considerati

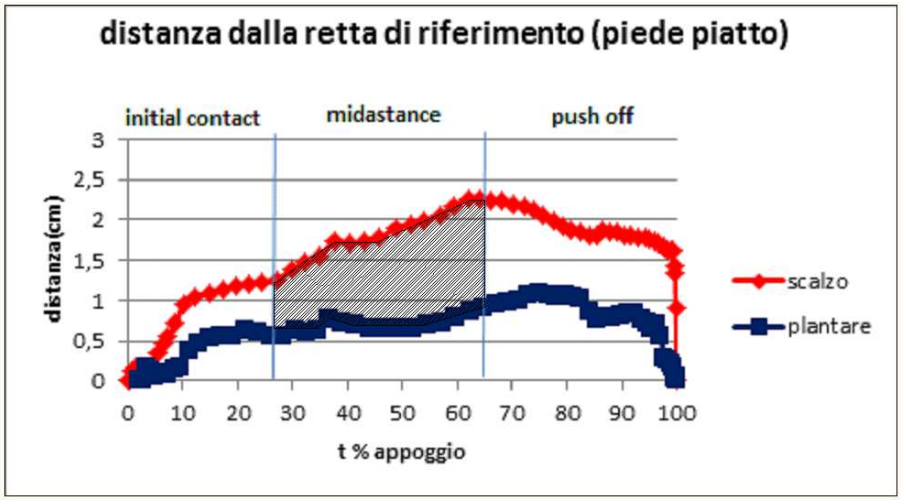


Fig. 5.22 Grafico delle distanze dei centri di pressione dalla retta di riferimento durante il periodo di appoggio per un piede affetto da piattismo. L'area tratteggiata corrisponde all'area di maggiore variazione

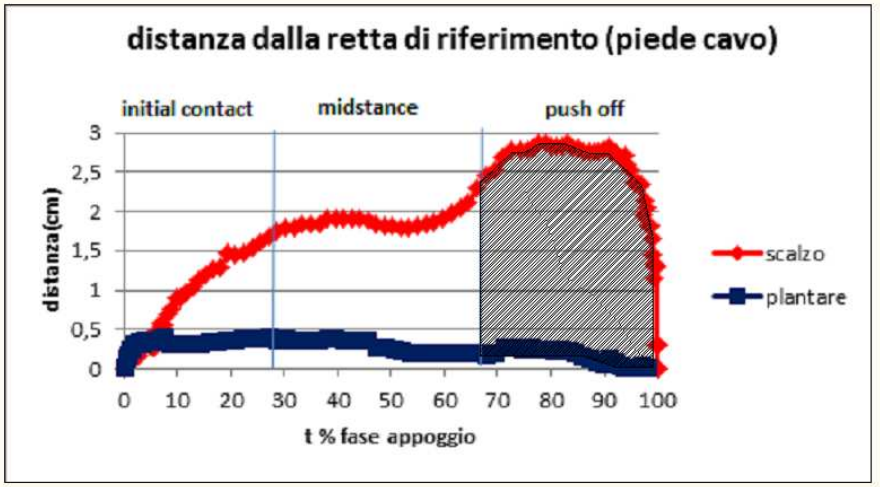


Fig. 5.23 Grafico delle distanze dei centri di pressione dalla retta di riferimento durante il periodo di appoggio per un piede affetto da piattismo. L'area tratteggiata corrisponde all'area di maggiore variazione

La maggiore variazione per il piede piatto si verifica nella fase di midstance mentre per il piede cavo nella fase di push off. Il plantare assegnato ai diversi soggetti è costruito su misura: con diversi materiali e strutture è stato creato per ogni soggetto un plantare adeguato tale da produrre in entrambi i casi lo stesso effetto finale cioè quello di ricondurre l'andamento del centro pressorio ad una retta. L'utilizzo del plantare, quindi, va agisce diversamente nelle varie fasi. In particolare si può notare come l'utilizzo del plantare sia più influente nelle fasi del passo corrispondenti alle fasi maggiormente compromesse dalla conformazione del piede che si sta analizzando. Nel piede piatto l'abbassamento della volta plantare, provocando una limitazione al rullaggio del piede, costringe il mesopiede a rimanere poggiato a terra per più tempo e con una superficie maggiore; questa alterazione della struttura si ripercuote nei movimenti che permettono lo svolgimento del passo. L'effetto si riflette in particolare nella fase di midstance durante la quale si ha un graduale trasferimento di carico dal retropiede alle teste metatarsali e fase in cui il mesopiede ha un ruolo di fondamentale importanza. La fase del passo che risulta maggiormente compromessa e in cui si ha il maggior azione correttiva dei plantari per i piedi piatti risulta la fase di midstance.

Nel piede cavo, invece, l'arcata plantare presenta un'eccessiva concavità che al momento dell'appoggio costringe l'avampiede a rimanere in carico per un tempo maggiore. Per questo motivo la fase di push off, in cui si verifica il trasferimento della maggior parte del carico sull'avampiede risulta in maggior misura compromessa nei piedi cavi. La metodologia esposta per valutare l'affetto del plantare può essere applicata per qualsiasi altro soggetto in modo da poterne ricavare i parametri fondamentali per eseguire il confronto con altri piedi tenendo però sempre a mente una considerazione necessaria da fare. Il plantare, come abbiamo visto, è la prima struttura ad interfacciarsi tra la superficie plantare e il suolo e il sue effetto sul piede è certamente fondamentale tuttavia c'è da considerare anche l'influenza della calzatura sull'analisi effettuata. Questo fattore, per come è stato svolto lo studio, per il gruppo di soggetti considerato e per la strumentazione utilizzata risulta difficile da eliminare, tuttavia potrebbe essere limitato svolgendo lo studio effettuando analisi di pazienti che indossano tutti il medesimo modello di calzatura.

Conclusione

Il lavoro svolto si presenta come la proposta di un metodo per poter effettuare una valutazione quantitativa dell'effetto dell'utilizzo di un plantare su piedi che presentano varie conformazioni. Il metodo suggerito prevede di essere a conoscenza della conformazione del piede che si sta analizzando e della tipologia di plantare che si utilizza.

Viene proposto di procedere con la valutazione separando il caso in cui il soggetto si trovi in una condizione statica dal caso in cui il soggetto stia eseguendo un passo. L'effetto del plantare in condizione statica viene valutato prendendo in considerazione il parametro del fattore di forma; esso deriva direttamente dalle grandezze rilevate dallo studio stabilometrico e dà un'indicazione sulla capacità del soggetto a mantenere fisso nello stesso punto il baricentro corporeo. Per entrambe le tipologie di conformazioni considerate, quella del piede piatto e quella del piede cavo, il valore del fattore di forma calcolato dall'analisi svolta utilizzando il plantare, è sempre inferiore rispetto al fattore di forma calcolato in corrispondenza di un'analisi effettuata con piede scalzo; ad una diminuzione del valore di questo parametro corrisponde un miglioramento della capacità del soggetto a non far variare la posizione del baricentro corporeo. Per questo motivo al plantare viene attribuito l'effetto di stabilizzare il soggetto ed essere un valido ausilio per il mantenimento della postura e dell'equilibrio.

La valutazione dell'effetto del plantare mentre il soggetto si trova in condizioni dinamiche viene effettuata confrontando gli andamenti dei centri pressori che si ottengono eseguendo il passo con piede scalzo e con piede con scarpa e plantare; in particolare, si analizzano i valori ottenuti dalla procedura appositamente ideata per quantificare le diversità degli andamenti dei centri di pressione. Dalla valutazione dell'effetto del plantare effettuata con il metodo appena descritto, per un caso di piede piatto e un caso di piede cavo è risultato che il plantare va ad agire nelle fasi del passo che maggiormente risentono della differente conformazione del piede analizzato.

Il metodo proposto cerca di restituire dei valori numerici indicativi della variazione subita in corrispondenza delle diverse fasi del passo; grazie a questi è possibile

effettuare dei rapportai tra soggetto e soggetto anche se questo tipo di confronto non si verifica nelle migliori condizioni a causa delle diversità delle calzature con cui vengono effettuate le analisi; il metodo può risultare particolarmente utile per eseguire la valutazione su uno stesso soggetto dell'effetto del un plantare nel tempo in particolare il lavoro svolto può essere d'aiuto per lo sviluppo di modelli numerici capaci di descrivere i fenomeni di interazione tra piede e plantare.

Ringraziamenti

Giunta quasi al termine, mi sento in dovere di ringraziare tutte le persone che hanno contribuito alla realizzazione di questo lavoro di tesi.

Ringrazio il professor Arturo Natali per la fiducia riposta nell'accettare l'attività sperimentale proposta in un ambiente esterno a quello dell'università; ciò mia ha permesso di conoscere anche altre realtà in cui applicare e mettere alla prova ciò che si è potuto acquisire durante gli studi.

Ringrazio la correlatrice Ing. Antonella Forestiero per la gran disponibilità e precisione sempre dimostrate nel seguire l'attività svolta, i suoi suggerimenti e consigli sono stati di fondamentale importanza. Rringrazio l'unità operativa di Biomeccanica dell'Ospedale all'Angelo di Mestre: Cristina. Cistina, Maurizio per avermi accolto tra loro ed accompagnato con molta pazienza ed attenzione durante il periodo di raccolta dati e ringrazio il dottor Andrea Perissinotto per la sua professionalità, per i consigli ed i suggerimenti forniti e per aver accettato la proposta permettendomi fare un'esperienza al di fuori degli ambienti universitari di cui sono stata molto soddisfatta.

Ringrazio inoltre Martina, compagna di avventure e valoroso sostegno nei momenti di difficoltà incontrati.

Bibliografia

Parkkola T., 1995. Anatomy of the Achilles tendon (tendo calcaneus) with respect to tendon thickness measurements. Surg Radiol Anat 17: 263-268.

I.A.Kapandji, Roma 1977. Fisiologia articolare. Volume II, Marrapese editore.

Jacqueline Perry, 2005. Analisi del movimento. Elsevier.

D.J. Cunningham, Padova 1970. Manuale di anatomia pratica. Volume primo, Piccin editore.

Luca Avagnina, E.Benguerbi, G.Schmidt, Bologna 2003. Diagnostica biomeccanica con pedane di pressione. Timeo Editore.

Angelo Cappello, aurelio Cappozzo , Pietro Enrico di Prampero, Bologna 2003. Bioingegneria della postura e del movimento. Patron editore.

De Cock, J. Vantrenterghem, T Willems, E. Witvrouw, D. De Clercq. The trajectory of the centre of pressure during barefoot running as a potential measure for foot function. Elsevier, Gait and Posture 2007.

Yuancheng Jian, D A Winter, MG Ishac, L Gilchrist. Trajectory of the body COG and COP during initiation and termination of gait. Gait and Posture 1993.

Benno M. Nigg, Pro Stergiou, Gerald Cole, Darren Stefanyshyn, Anne Mundermann, Neil Humble.Effect of Shoe Insert on Kinematics, Centre of Pressure, and Leg Joint Moments during Running. Official Journal of the American College of Sports Medicine 2002.

Buratto Advanced Technology S.r.l., FAS ACP: manuale d'installazione, uso e manutenzione

Maurizio Contorto, articolo sul piede piatto, Università "Magna Graecia"di Catanzaro

Corso di Laurea di Podologia

Luigi Segatore, Novara 1967, Dizionario medico. IV edizione Istituto Geografico De Agostini.

Asl Milano, Il piede piatto valgo nel bambino

Eric Pisciotta, James Becker, Komsak Sinsurin, Stan James, Louis Osternig, and 1Li-Shan Chou, Center of pressure trajectory differences between shod and barefoot running, 1Department of Human Physiology, University of Oregon,

Nima Jamshidi, Mostafa Rostami, Siamak Najarian, Mohammead Bagher Menhaj, , Mohammad Saadatnia, Firooz Salami 2008. Differences in centre of pressure trajectory between normal and steppage gait, University of Technology, Tehran, Iran

Siti web

http://www.ortopediapediatrica.com

http://www.podartis.it