
UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA



FACOLTA' DI INGEGNERIA

**CONFIGURAZIONE MORFOMETRICA
DEL PIEDE IN RELAZIONE A
CONDIZIONI PATOLOGICHE**

Relatore: Ch.mo Prof. ARTURO N. NATALI

Correlatore: Ing. ANTONELLA FORESTIERO

Laureanda: MARTINA CORAZZOL

Corso di laurea triennale in Ingegneria Biomedica

Anno Accademico 2009/2010

Caratterizzazione della configurazione del piede in relazione a condizioni patologiche

Indice

INTRODUZIONE	4
Capitolo 1: Caratterizzazione delle grandezze antropometriche del piede	8
1.1 Funzionalità del piede.....	8
1.2 Caratterizzazione anatomica del piede.....	10
1.2.1 Componenti ossee.....	11
1.2.1.1 Gli archi plantari.....	14
1.2.2 Componenti muscolari e tendinee.....	16
1.2.3 Componenti legamentose.....	18
1.2.4 Componenti di tessuto connettivale.....	19
1.2.5 Nervi e vasi sanguigni.....	20
1.2.6 Ghiandole sudoripare.....	20
Capitolo 2: Valutazione morfometrica della geometria esterna del piede	22
2.1 Tecniche di analisi per la valutazione della configurazione esterna del piede.....	22
2.1.1 Tecnica manuale.....	23
2.1.2 Tecnica automatica.....	26
2.2 Definizione dei parametri antropometrici utilizzati per valutare la geometria esterna del piede.....	29
2.3 Valutazioni delle grandezze antropometriche con possibili confronti.....	36
2.3.1 Variazioni morfometriche dovute al genere.....	38
2.3.2 Variazioni morfometriche dovute all'età.....	40
2.3.3 Variazioni morfometriche dovute all'etnia di provenienza.....	41
2.3.3.1 Variazioni morfometriche in gruppi di atleti.....	44

Capitolo 3: Valutazione morfometria delle componenti scheletriche del piede	48
3.1 Tecniche di analisi per la valutazione della morfometria ossea del piede.....	48
3.1.1 Metodo semi automatizzato basato sulle immagini ottenute ai raggi X.....	49
3.2 Morfometria delle ossa della caviglia.....	50
3.2.1 Morfometria della tibia e della fibula.....	50
3.2.2 Morfometria dell'astragalo.....	55
3.2.3 Morfometria del calcagno.....	58
3.3. Valutazione dei parametri morfometrici relativi alla struttura ossea del piede...	62
3.4 Valutazione delle posizioni relative tra coppie di segmenti ossei del piede.....	67
3.5 Valutazione delle grandezze antropometriche relative agli archi plantari.....	72
Capitolo 4: Valutazione della morfometria generale del piede in relazione al piede piatto e cavo	77
4.1 Il piede cavo.....	76
4.2 Il piede piatto.....	86
4.3 Effetti della tipologia di piede sui parametri antropomorfometrici.....	90
4.3.1 Protocollo per classificare un piede normale e piatto usando misure cliniche e radiografiche.....	98
4.4 Valutazione della configurazione interna delle ossa nel piede piatto e cavo.....	104
4.5 Valutazione delle distribuzioni pressorie in base alla tipologia del piede.....	110
CONCLUSIONE	118
APPENDICE A	120
BIBLIOGRAFIA	140

Introduzione

Nel corso della storia, il piede è stato oggetto di studio di notevole interesse per molteplici ambiti dei quali i più significativi sono quello medico e meccanico, seguiti da quello artistico ed estetico. L'aspetto medico ha permesso di approfondire le caratteristiche anatomiche e funzionali, per poter comprendere al meglio le patologie ed essere efficaci nella loro cura e prevenzione. L'aspetto artistico, si è sviluppato nell'ambito della storia dell'arte, nel quale si trovano esempi di studi di modelli anatomici e della gestualità, ma anche raffigurazioni di riti e usanze antiche.



Figura 1. Giotto, “La lavanda dei piedi” (particolare), Cappella degli Scrovegni. A destra il piede nella pratica scultorea classica.

L'aspetto estetico è stato sempre particolarmente curato e non solo dalle donne; spesso, la ricerca della bellezza esasperata, ne ha condizionato l'armonia anatomica e funzionale, ad esempio tramite la scelta di una calzatura sbagliata. L'aspetto

meccanico ha stimolato invece la riproduzione del piede in termini di resistenza, adattabilità ed equilibrio. Solo ultimamente, grazie al supporto dell'ingegneria e soprattutto della robotica, è stato possibile costruire piedi meccanici affidabili, anche se ancora lontani dalla perfezione e dall'adattabilità del piede umano. Gli ultimi decenni del secolo appena trascorso hanno conferito al piede la giusta identità e collocazione in ambito medico grazie allo studio e alla dedizione monotematica che fino ad allora era mancata. Oggi il piede è tra le più osservate e studiate parti del corpo per la fondamentale funzione che svolge in ambito posturale, essendo alla base del sistema antigravitario che permette all'uomo la stabilità e la deambulazione, grazie a complessi meccanismi di regolazione, dai quali dipende il benessere nel movimento di ogni individuo.



Figura 2. Oscar Pistorius e le sue protesi.

Il presente elaborato è frutto di un'accorta ricerca in merito alla morfometria propria del piede, al fine di caratterizzare non solo qualitativamente, ma anche quantitativamente la sua forma. Lo scopo è quello di ripercorrere in modo coerente la strada che dall'accurata conoscenza anatomica conduce alla conoscenza morfometrica, utile per la valutazione dei parametri che caratterizzano la geometria esterna del piede, per poi progredire nella descrizione della morfometria interna, con particolare attenzione alla struttura e alle posizioni reciproche tra segmenti ossei. È importante notare come la posizione delle ossa cambi all'interno del piede per permettere il movimento e quindi la deambulazione. Si è allora studiata la conformazione degli archi interni e, in particolare, come tutti i parametri appena

citati si modificano nel caso delle patologie del piede cavo e piatto. È infine stata eseguita un'analisi sulla distribuzione pressoria per determinare come, in relazione a queste patologie, la pressione vari in conseguenza alla diversa distribuzione dei carichi, dovuta alla modificazione della superficie di appoggio, che diminuisce nel piede cavo e aumenta nel piede piatto.

Nel primo capitolo vengono analizzate le diverse strutture che compongono il piede da un punto di vista anatomico, per dare un'idea generale della complessità delle variabili da tenere in considerazione per la sua caratterizzazione.

Nel secondo capitolo sono espone le tecniche più utilizzate al fine di svolgere una valutazione morfometrica esterna del piede, vengono di conseguenza presentati i parametri più significativi, capaci di classificare la variabilità delle componenti di interesse del piede. I dati raccolti da campioni diversi sono confrontati per valutare come questi parametri varino in base al genere, con il progredire dell'età e per le diverse etnie.

Il terzo capitolo è anch'esso focalizzato sulla valutazione della struttura del piede, ma l'attenzione viene spostata dall'esterno verso l'interno, ciò che interessa è la morfometria globale delle ossa e come queste, assumendo determinate posizioni tra loro, tramite scorrimenti e rotazioni, riescano a mutare la forma per permettere la deambulazione e l'articolazione del passo.

Infine, nel quarto capitolo sono prese in considerazione le patologie del piede piatto e del piede cavo, dopo una breve descrizione clinica l'interesse viene focalizzato su come queste deformazioni influenzino i normali parametri morfometrici e strutturali, in particolare la configurazione degli archi. Il capitolo si conclude trattando le distribuzioni pressorie relative al piede normale, piatto e cavo.

Tale lavoro è finalizzato all'ampliamento delle conoscenze generali nell'ambito della morfometria, e quindi risulta utile al fine di costruire modelli solidi fedeli al piede umano, con la speranza di poter contribuire allo sviluppo dei mezzi a disposizione sia in campo clinico, con l'introduzione di tecniche di analisi sempre più accurate, sia in campo ingegneristico.

Capitolo 1

CARATTERIZZAZIONE DELLE GRANDEZZE ANTROPOMETRICHE DEL PIEDE

1.1 Funzionalità del piede

Il piede è alla base del sistema antigravitario (sistema posturale o di equilibrio) che ha consentito all'uomo di assumere la postura eretta e di spostarsi nello spazio. È il punto fisso al suolo su cui grava l'intero peso del corpo e nel suo ruolo di "base antigravitaria", in un primo tempo prende contatto con la superficie di appoggio adattandosi ad essa rilasciandosi, successivamente si irrigidisce, divenendo una leva per "respingere" la superficie stessa. Il piede deve quindi alternare la condizione di rilascio con la condizione di irrigidimento. L'attitudine all'irrigidimento è infatti una caratteristica peculiare umana acquisita grazie alle esigenze sorte nella deambulazione bipodale. Inoltre nel corso dell'evoluzione, che dura da 350 milioni di anni, si può osservare un continuo scambio tra informazione ambientale e genetica che, con il susseguirsi delle generazioni, ha consentito il potenziamento e la genesi delle caratteristiche antigravitarie. Il fattore culturale ha però interferito su tale sviluppo alterando l'informazione ambientale e creando, per esempio, terreni e scarpe inadeguati, seguendo come spesso accade i dettami della moda, e causando così un inevitabile ritardo evolutivo. Il piede, nel corso della storia, si è evoluto da una forma prensile alla forma stabilizzatrice (antigravitaria), conservando però la complessità della propria muscolatura, e diventando così il meccanismo più

sviluppato in risposta all'ambiente e agli stimoli esterni. È sia recettore che effetto, infatti riceve ed esegue i comandi (risposta motoria) tramite i muscoli e nel contempo interagisce con il resto del corpo, fornendo costantemente informazioni provenienti dagli esterocettori cutanei, presenti sulla pianta del piede, e dai propriocettori dei muscoli dei tendini e delle articolazioni. Le informazioni plantari sono le uniche a derivare da un recettore sensoriale fisso a diretto contatto col suolo. Il *riflesso plantare* (flessione delle dita al graffiamento della pianta), legato alle stimolazioni cutanee della pianta del piede, è in grado di attivare e modulare riflessi molto complessi con funzioni posturali di notevole importanza. Pertanto il piede è considerato il principale organo di senso e di moto antigravitario del corpo umano, come si denota nelle rappresentazioni motorie e sensitive dell'homunculus.

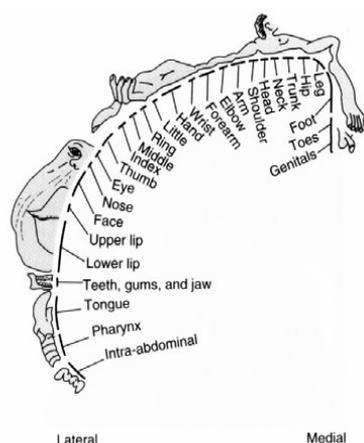


Figura 1.1 Rappresentazione homunculus.

Il piede è l'elemento adattativo che tampona gli squilibri alti, in genere discendenti dall'apparato stomatognatico (denti e articolazione temporomandibolare) e/o dagli occhi e/o dal vestibolo. Proprio per questo motivo nelle popolazioni dei paesi sviluppati che vivono su un terreno poco fisiologico quale è il terreno piano il piede è normalmente l'origine dello squilibrio posturale.

Il corpo umano è infatti un *sistema di equilibrio instabile*; sono fattori di instabilità l'altezza del centro di gravità (idealmente anteriore alla terza vertebra lombare) rispetto a una base ristretta e la struttura composta da una successione di segmenti articolati. Solo un vigile controllo (sistema tonico posturale) riesce, in tale condizione, a ricercare l'equilibrio dinamico stabile nella stazione eretta e l'equilibrio

dinamico instabile durante la locomozione (che consente la trasformazione dell'energia potenziale in energia cinetica). Ciò avviene soprattutto grazie a un servizio informativo (barocettori cutanei e propriocettori) talmente preciso e tempestivo da consentire risposte validissime, con interventi energeticamente economici (non rilevabili elettromiograficamente da parte di muscoli con prevalenza di fibre rosse). Si tratta della manifestazione informativa più importante, in quanto fornisce all'uomo il privilegio di adattarsi alle più svariate condizioni ambientali.

Il piede è interposto tra forze ambientali esterne e forze muscolari interne, che in esso si incontrano, si contrastano e infine si fondono per l'affermazione della condizione di equilibrio. È quindi una struttura "spaziale" atta ad assorbire e smistare le forze, relativamente agli infiniti piani dello spazio. In biomeccanica, nessuna forza interna a un corpo, ossia che si esaurisce nell'ambito del corpo (rappresentata dai muscoli nel caso dell'uomo), è in grado di spostarlo nello spazio. Affinché il corpo si muova è necessaria una forza esterna. Le forze esterne ambientali per eccellenza sono: la gravità, la reazione al suolo e l'attrito. L'uomo moderno ha nei piedi i più efficaci strumenti per prelevare dalla gravità le energie necessarie per la locomozione. Non vi è dubbio che quella "gravitazionale" è l'attività senso-motrice di gran lunga più importante e il movimento che la esprime può essere concepito come il fattore determinante al fine della vita dell'uomo, quale essere più esposto alle "aggressioni" ambientali.

1.2 Caratterizzazione anatomica del piede

Per studiare l'anatomia del piede si prendono in considerazione le sue parti costitutive:

ossa;

archi;

muscoli e tendini;

legamenti;

tessuto connettivale;

nervi e vasi sanguigni.

ghiandole sudoripare.

1.2.1 Componenti ossee

Il piede rappresenta un sistema architettonico complesso dotato di tre principali caratteristiche : solidità, flessibilità e stabilità. La sua struttura è un capolavoro oltre che di architettura anche di biomeccanica, con le sue 28 ossa, compresi i sesamoidi costanti (il loro numero può variare per la presenza di uno o più sesamoidi incostanti o di alcune delle dieci ossa accessorie del piede), 33 articolazioni e 20 muscoli. Il piede si può dividere topograficamente in tre porzioni :

Avampiede : che comprende le ossa delle falangi (14) e dei metatarsi (5)

Mesopiede : che comprende i 3 cuneiformi e il cuboide, e lo scafoide tarsale

Retropiede : che comprende astragalo e calcagno

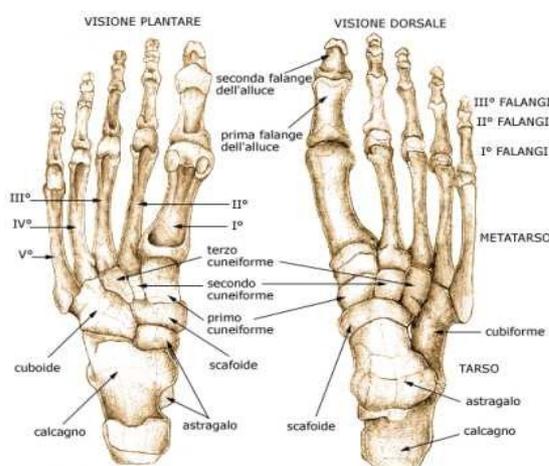


Figura 1.2. Le ossa del piede.

Retropiede e avampiede si dispongono in piani che si intersecano in modo variabile. Nella condizione ideale, il retropiede è disposto verticalmente e l'avampiede orizzontalmente (su una superficie di appoggio orizzontale). A piede sotto carico la torsione tra retropiede e avampiede si attenua nel rilassamento (il piede diviene una piattaforma modellabile) e si accentua nell'irrigidimento (il piede diviene una leva).

La disposizione ad arco è in realtà apparente essendo espressione del grado di avvolgimento dell'elica podalica. Il piede quindi non ha il significato di un arco o volta reale ma apparente, che si alza durante l'avvolgimento e si abbassa durante lo svolgimento dell'elica. L'avvolgimento dell'elica, con la conseguente accentuazione dell'apparente disposizione ad arco, corrisponde al suo irrigidimento. Lo svolgimento dell'elica, con conseguente attenuazione dell'arco apparente, è il rilasciamento. La torsione (avvolgimento) dell'elica podalica è connessa alla rotazione esterna (extrarotazione) dei segmenti sovrapodalici (gamba e femore). L'astragalo ruotando all'esterno solidalmente con le ossa della gamba, sale sul calcagno chiudendo in tal modo l'articolazione medio-tarsica; il retropiede si verticalizza. L'avampiede aderendo tenacemente al suolo reagisce alle forze torcenti applicate sul retropiede; il piede è quindi irrigidito. Occorre tener presente che in biomeccanica sono presenti numerosi meccanismi elicoidali in quanto, fungendo come piani inclinati, consentono di agire con sforzi minimi su rilevanti resistenze.

Il piede può inoltre essere suddiviso in ulteriori tre regioni, ovvero il tarso, il metatarso e le falangi.

- Il tarso, che presenta alcune analogie con il carpo della mano, è costituito da sette ossa (calcagno, astragalo, scafoide (o navicolare), cuboide e le tre ossa cuneiformi) che occupano tutta la metà prossimale del piede, di cui la più voluminosa di tutte è il calcagno. Nel tarso si distinguono due file, la prima, prossimale, è formata dal talo e dal calcagno, la seconda, più distale e interposta tra questa e il metatarso, è formata, procedendo trasversalmente da mediale a laterale, dal primo, secondo e terzo osso cuneiforme e dall'osso cuboide. Frapposto alle due file vi è l'osso navicolare. La disposizione delle ossa nelle due file forma un'arcata convessa dorsalmente. Tutte le ossa del tarso presentano un asse maggiore antero-posteriore, con l'eccezione del navicolare che lo possiede latero-laterale. L'astragalo è collegato alle due ossa lunghe con le quali costituisce l'articolazione della caviglia che permette al piede di muoversi su e giù.

- Il metatarso, posto nella metà distale del piede, è costituito da 5 ossa dalla morfologia simile che collegano il tarso alle falangi. Sono tutte ossa lunghe e dunque possiedono un'epifisi prossimale ed una distale, collegate da una diafisi. Le diafisi delle ossa metatarsali sono convesse sulla superficie dorsale e concave su quella plantare, contribuendo alla formazione dell'arcata plantare del piede. Articolate, sono tutte leggermente inclinate medialmente. I metatarsi costituiscono un ponte tra la parte centrale del piede e le dita e si allargano quando si carica il peso sul piede. C'è una parte arrotondata su ciascun osso, chiamata testa metatarsale, che forma il cuscinetto del piede e sostiene il peso del corpo.
- Le falangi sono le ossa delle dita dei piedi. Le falangi del piede sono costituite da 14 piccole ossa, tre in ciascun dito, dette prossimale, intermedia e distale, fatta eccezione per l'alluce che ne possiede due, prossimale e distale. Talvolta il quinto dito possiede solo due falangi. Rispetto alla mano le falangi del piede sono più corte, schiacciate in senso latero-laterale, convesse dorsalmente e concave plantarmente. Caratteristica delle falangi intermedie del piede è quella di avere un'epifisi distale costituita da una troclea, che si articola con l'epifisi prossimale delle falangi distali.

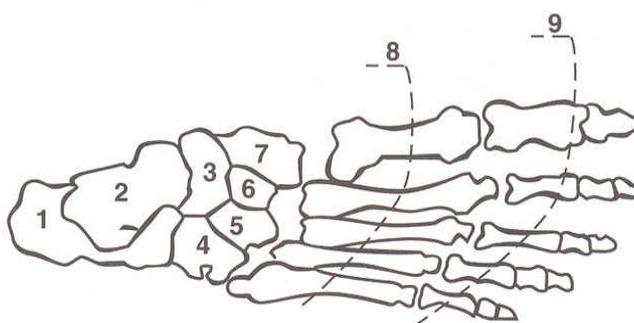


Figura 1.3. Struttura delle ossa del piede. Zona tarsale: 1. calcagno; 2. astragalo; 3. scafoide; 4. cuboide; 5, 6, 7, ossa cuneiformi

Le ossa del piede sono tenute in posizione, mosse e sostenute da una rete di muscoli, tendini e legamenti.

1.2.1.1 Gli archi plantari

Da un punto di vista meccanico il piede può essere paragonato ad una “capriata”, cioè ad una struttura architettonica triangolare con il compito di eliminare le spinte orizzontali, costituita da due travi articolate insieme al colmo del tetto e sostenute alla base da un tirante che impedisce il collasso della struttura, se sottoposta ad un carico. Il segmento orizzontale è formato da potenti legamenti plantari e da muscoli plantari per il sostegno della struttura. In realtà la struttura si presenta in modo tridimensionale, con tre punti d'appoggio principali, collocati nell'impronta plantare. Tra i tre punti anteriori (Figura 1.6. A-B) è teso l'*arco trasversale*, il più corto e il più basso. Fra i due punti esterni è teso l'*arco longitudinale esterno* (A-C) e tra i due punti interni l'*arco longitudinale interno* (B-C) il più lungo ed alto. Quest'ultimo è il più importante dei tre sia da un punto di vista statico che dinamico, sotto carico si appiattisce e si allunga.

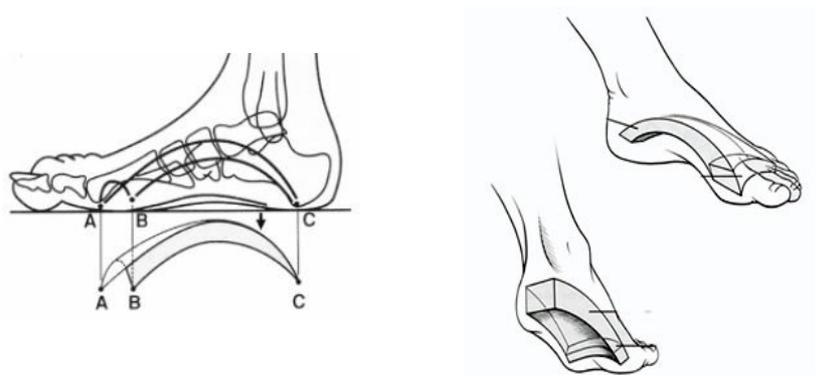


Figura 1.6. Archi plantari.

Arco longitudinale interno

Il piede presenta un'arcata principale nota come “arco longitudinale interno” che si estende dal calcagno fino alla testa del primo metatarso, comprendendo quattro segmenti ossei: il primo metatarso, che poggia al suolo solo con la sua testa, il primo cuneiforme, interamente sospeso, lo scafoide, chiave di volta di questo arco a 15-18 mm dal suolo ed il calcagno, che poggia al suolo solamente con la sua estremità

posteriore. I legamenti plantari resistono agli sforzi violenti e di breve durata, invece i muscoli plantari si oppongono alle deformazioni prolungate. Il muscolo tibiale posteriore forma una corda parziale tesa vicino alla sommità dell'arco e il suo ruolo è essenziale: conduce lo scafoide in basso ed indietro sotto la testa dell'astragalo. Ad un accorciamento relativamente piccolo del tendine, corrisponde ad un cambiamento di orientamento dello scafoide che produce un abbassamento del pilastro di sostegno anteriore. Il peroneo lungo laterale agisce anche sull'arco interno di cui aumenta la concavità flettendo il primo metatarso sul primo cuneiforme e quest'ultimo sullo scafoide. Questo arco si comporta come una molla che ha la funzione di assorbire e attenuare sollecitazioni e colpi.

Arco longitudinale esterno

Nello scheletro del piede, l'arco longitudinale esterno si estende dalla parte anteriore del calcagno alla testa del quinto metatarso attraversando solamente tre segmenti ossei: il quinto metatarso, la cui testa costituisce il punto di appoggio anteriore dell'arcata anteriore, il cuboide, totalmente sospeso dal suolo e il calcagno, le cui tuberosità posteriori costituiscono il punto di appoggio dell'arcata. Questa arcata, a differenza dell'interna, che è alta sul suolo, è poco elevata (3-5 mm) e prende contatto con il suolo attraverso le parti molli. Mentre l'arco interno è elastico, grazie alla mobilità dell'astragalo sul calcagno, l'arco esterno è molto più rigido per di trasmettere l'impulso motore del tricipite.

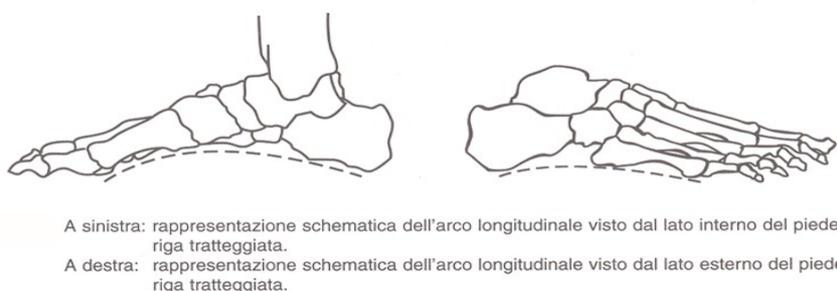


Figura 1.4. Rappresentazione dell'arco interno ed esterno.

Arco trasversale

L'arco trasversale, interdipendente con l'arco longitudinale interno, coinvolge la

sezione trasversale, che interessa le basi delle cinque ossa metatarsali. È teso tra la testa del primo metatarso, che appoggia sui due sesamoidi, a 6 mm dal suolo, e la testa del quinto metatarso, anch'essa a 6 mm dal suolo. Questo arco anteriore passa per la testa degli altri metatarsali: la seconda testa, la più elevata (9 mm) forma la chiave di volta. La terza (8,5 mm) e la quarta (7 mm) sono in posizione intermedia. La concavità di questo arco è poco accentuata e appoggia al suolo per mezzo delle parti molli, costituendo quello che alcuni chiamano “il tallone anteriore” del piede.

1.2.2 Componenti muscolari e tendinee

La prima distinzione fondamentale da fare all'interno dell'insieme dei muscoli dell'arto inferiore è tra muscoli intrinseci, ovvero localizzati nel piede e che esercitano la loro azione su strutture del piede stesso, e muscoli estrinseci localizzati a livello di tibia perone (o fibula) e in grado di esercitare azioni direttamente a livello del piede, per inserzione diretta o riflessione. Gli stessi muscoli estrinseci esercitano la propria azione in parte sull'articolazione della caviglia ed in parte sulle strutture scheletriche interne. Questi muscoli, in particolare quegli intrinseci, sono a prevalenza di fibre rosse, ovvero ad azione lenta ma energeticamente economica e, mantenendo un certo tono muscolare pressoché ininterrotto in fase di stazione eretta, sono caratterizzati dall'attitudine all'irrigidimento ovvero alla coesione intersegmentale, capacità che, parallelamente all'azione delle strutture legamentose, permette di conferire grande stabilità alla connessione podalica. Per questo motivo, l'intervento muscolare globale nella realizzazione della coesione interessea è decisamente meno rilevante rispetto alla funzione di controllo e regolazione antigravitaria. Un'altra caratteristica fondamentale della podo-meccanica muscolare è che il piede è caratterizzato da un gran numero di muscoli che coinvolgono due o più articolazioni, in grado di offrire particolari vantaggi ai fini dell'economia energetica, in quanto permettono di sviluppare grandi tensioni con modici accorciamenti. Questi muscoli poliarticolari agiscono infatti stabilizzando l'articolazione prossimale e favorendo in questo modo il movimento dei segmenti

ossei distali. Indagini elettromiografiche hanno evidenziato l'effettiva efficienza energetica di questi muscoli in fase antigravitaria, sviluppando potenziali decisamente inferiori rispetto a quelli propri della contrazione tetanica. In stazione eretta il corpo umano è un sistema in equilibrio dinamico stabile, a causa dell'altezza del centro di gravità, del poligono d'appoggio di dimensioni ristrette e dalla struttura costituita dalla successione di elementi articolati distinti. Tale equilibrio si realizza attraverso un sistema informativo preciso e tempestivo garantito dalla capacità propriocettiva dei muscoli podali stessi, che permettono un movimento su base stazionaria, neutralizzando i momenti rotatori, indotti dalla migrazione ventrale della linea gravitaria del corpo, e i movimenti oscillatori sul piano frontale. Un ruolo fondamentale per garantire la massima funzionalità dei muscoli è svolto da delle particolari strutture connesse ai tendini, ovvero le guaine mucose, le quali permettono al tendine stesso di scorrere riducendo notevolmente gli attriti con altre componenti muscolari o ossee. Queste strutture connettivali sono presenti soprattutto a livello della cavaglia, dove è necessario ruotare le linee di azione dei carichi applicati dalle strutture muscolari attorno a "pulegge ossee" o attraverso i retinacoli dei muscoli stessi.

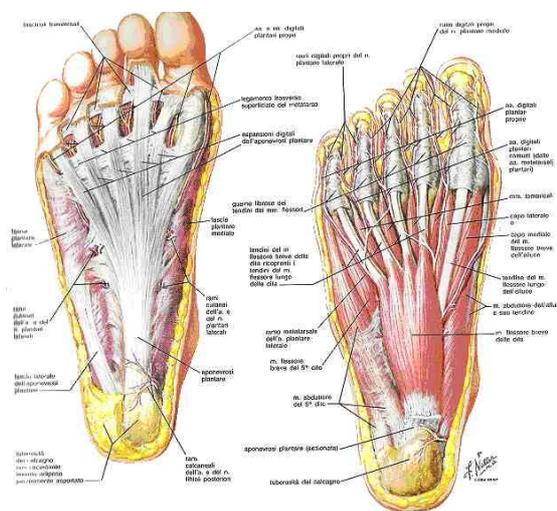


Figura 1.7. Raffigurazione di tendini e muscoli.

1.2.3 Componenti legamentose

Le strutture legamentose all'interno del piede svolgono essenzialmente la funzione di stabilizzazione delle articolazioni e permettono il mantenimento strutturale della forma della volta plantare. Le articolazioni del piede sono complesse e numerose. Tra queste si distinguono principalmente un'articolazione superiore, l'articolazione talocrurale o tibio-tarsica, ed un'articolazione inferiore rappresentata dalle articolazioni subtalare e talocalcaneonavicolare. Di grande importanza sono anche l'articolazione cuneonavicolare, calcaneocuboidea, cuneocuboidea e le articolazioni intercuneiformi. L'articolazione superiore permette movimenti di dorsiflessione e di flessione plantare, ed è soggetta a grandissime sollecitazioni. Per questo motivo la capsula articolare è rinforzata lateralmente da robusti e resistenti legamenti che insieme ai malleoli sono in grado di stabilizzare la caviglia sotto l'azione di carichi che impongono rotazioni laterali. Il principale legamento che svolge questa funzione è il legamento collaterale mediale detto anche legamento deltoide mediale, che è costituito da una parte tibioalcaneare e da una parte tibiotalare. Altri legamenti di fondamentale importanza sono: il legamento talofibulare anteriore, il talofibulare posteriore ed il legamento calcaneofibulare, i quali vengono a formare congiuntamente il legamento collaterale laterale. L'articolazione inferiore invece, essendo un'articolazione trocoidea, permette un movimento di rotazione realizzato attraverso la pronazione e la supinazione. I legamenti più importanti che la costituiscono sono: il legamento biforcuto, che mantiene coesi calcagno, cuboide e navicolare, ed il legamento talocalcaneare interosseo che separa la porzione posteriore di questa articolazione da quella anteriore. Un ruolo fondamentale è svolto dall'aponeurosi plantare, originariamente tendine del muscolo plantare che, a seguito dell'evoluzione e con la trasformazione del piede da organo prensile a organo di sostegno, si è atrofizzato e ora si inserisce tra il calcagno e nella zona di pelle prossimale alle ossa metatarsali confondendosi con i legamenti vaginali. Recenti studi hanno rilevato che a livello del calcagno l'aponeurosi presenta una continuità

con il Tendine d'Achille, fatto di fondamentale importanza in quanto permette un movimento congiunto di flessione plantare della caviglia e delle stesse dita del piede. Il principale ruolo che svolge è quello di mantenere la curvatura tipica della volta plantare sia longitudinale che trasversale, ma è fondamentale anche come sistema di protezione dei vasi e dei fasci nervosi. Un altro legamento importante è il plantare lungo situato sopra l'aponeurosi plantare e ha il compito di tenere unita la fila laterale delle ossa tarsali; e' uno strato fibroso lungo che parte dal calcagno in direzione distale e termina nel cuboide prima e nelle ossa metatarsali dopo. 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 permettono di ruotare la direzione di applicazione delle azioni muscolari. I più importanti sono i retinacoli dei muscoli estensori e dei muscoli flessori, si tratta di membrane molto sottili disposte a livello sottocutaneo e ancorate a strutture ossee, che si comportano essenzialmente come “pulegge”.

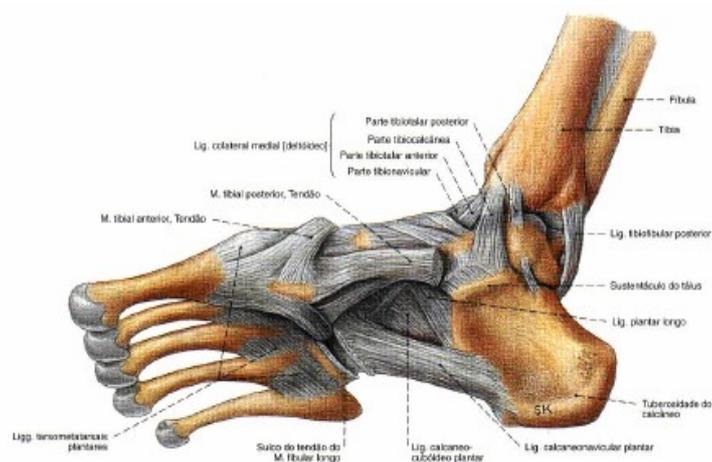


Figura 1.8. Legamenti del piede.

1.2.4 Componenti di tessuto connettivale

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 o meno adipe, mentre nell'uomo è veramente scarso. 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 cammino. 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 dura e cornea e, talvolta, si formano delle vere e proprie callosità.

1.2.5 Nervi e vasi sanguigni

I nervi del piede si caratterizzano come sensori di un sistema elettrico di impulsi che permette di inviare messaggi inerenti al caldo, freddo, pressione, dolore e mali in genere. Il sistema sanguigno trasporta da più di 50 fino a circa 90 litri di sangue che fluiscono quotidianamente attraverso ciascun piede.

1.2.6 Ghiandole sudoripare

Le ghiandole sudoripare sono presenti nel piede in numero maggiore, per unità di superficie, di quanto lo sia quello di ogni altra parte del corpo. Un canale immette

dalla ghiandola e porta in superficie l'umidità. E' uno dei modi che permette al corpo di eliminare liquido non voluto e insieme tiene la pelle flessibile e aiuta a controllare la temperatura. Quando il corpo diventa caldo, per esposizione al sole, per attività muscolare o a causa della febbre, una maggiore quantità di sudore viene prodotta e questa rinfresca il corpo mentre evapora.

Capitolo 2

PARAMETRI CONSIDERATI AL FINE DI VALUTARE LA MORFOMETRIA DEL PIEDE

2.1 Tecniche di analisi per la valutazione della configurazione esterna del piede

Al fine di definire un modello solido delle componenti del piede da utilizzare come punto di partenza per valutazioni più specifiche in ambito medico e ingegneristico, come per affrontare problemi inerenti alle varie patologie, alla chirurgia e anche alla protesica, è opportuno non soffermarsi solo ad osservazioni qualitative. Il problema dell'anatomia del piede viene quindi affrontato con lo scopo di quantificare la morfometria propria del piede, al fine di ottenere informazioni preziose per quanto riguarda le sue componenti esterne, interne e di conseguenza per definire un modello che descriva anche i rapporti che tra queste insistono. A tale scopo, molte ricerche odierne cercano di quantificare i parametri ritenuti d'interesse, servendosi di varie tecniche ovviamente in repentino cambiamento grazie anche al veloce sviluppo in questo senso della tecnologia. Tra le molte tecniche a disposizione della ricerca, si possono così riassumere i principali metodi qui trattati e messi a confronto per la valutazione della configurazione esterna : metodo manuale (MM) e metodo completamente automatizzato (CP). É da notare che tali metodi necessitano di una piattaforma o scanner e di un software per l'elaborazione dei dati. Esistono anche altre tecniche che fanno uso di immagini fotografiche, o di strumenti di misura più utilizzati in passato quali : antropometro, calibro scorrevole, nastro di acciaio, bilancia, piattaforma per piede destro e sinistro, blocco regolabile ecc. Il più comune tra quest'ultimi è l'antropometro, strumento versatile che consiste in quattro segmenti

connessi tra loro che permettono di misurare varie altezze del piede. Il segmento più alto può essere convertito in calibro, utile per misurare dimensioni troppo larghe o profonde per il calibro scorrevole. Il metodo manuale si attiene a delle linee guida dettate dal comitato per la ricerca pratica dell'Università della Scienza e della Tecnica di Hong Kong. In seguito vengono paragonate le prestazioni del metodo manuale con quelle del metodo automatico.

2.1.1 Tecnica manuale

É qui esposto un nuovo metodo per la caratterizzazione esterna del piede, che grazie all'impiego di pochi marcatori, applicati manualmente nelle giuste posizioni, è in grado, tramite un'acquisizione scanner, di ricostruire un modello in tre dimensioni della forma esterna del piede. Un tale progetto parte dall'interesse, forse più economico che scientifico, di testare la calzabilità delle scarpe in quei casi nei quali non è possibile farlo direttamente tramite la classica prova, a causa dei molti modelli da provare, di ostacoli mediatici dovuti alla tecnologia (per esempio l'e-commerce), od anche a problemi fisici relativi all'utente, come per esempio sensibilità limitata nel piede. In tutti questi casi, la previsione di una calzabilità automatica potrebbe essere d'aiuto. I ricercatori dell'università di Valencia (Spagna) hanno cercato di creare un database, che comprendesse forme in 3D del piede e alcuni resoconti, circa 300, sulla calzabilità di alcuni tipi di scarpe, usate come campione. Inizialmente lo scopo era quello di acquisire dati sulla calzabilità e, successivamente, si è rivelato una fonte preziosa per l'analisi anatomica della forma del piede. Il progetto è stato svolto nel maggio 2004, all'Università Politecnica di Valencia, su un totale di 316 donne, di età compresa tra i 18 e i 35 anni, con il numero 38, secondo la misura europea. É stato ritenuto infatti che in tale fascia d'età il piede fosse sufficientemente sviluppato e allo stesso tempo non mostrasse il tipico avanzamento di patologie correlate all'età. Per ogni soggetto sono state acquisite inizialmente le forme in 3D del piede destro, con l'uso di alcuni punti chiave del piede, nei quali sono stati posizionati dei "marker", o marcatori. É stato poi chiesto ai soggetti di provare quattro modelli di scarpe diversi,

su otto possibili, e compilare un questionario sulla calzabilità delle singole scarpe, per avere un riscontro. Per l'acquisizione in 3D della forma del piede, è stato usato lo scanner laser INFOOT. Quest'ultimo può acquisire la completa immagine 3D della forma del piede. Inoltre, è stato utilizzato per acquisire la posizione dei punti di riferimento, tramite la semplice marcatura degli stessi con degli adesivi.

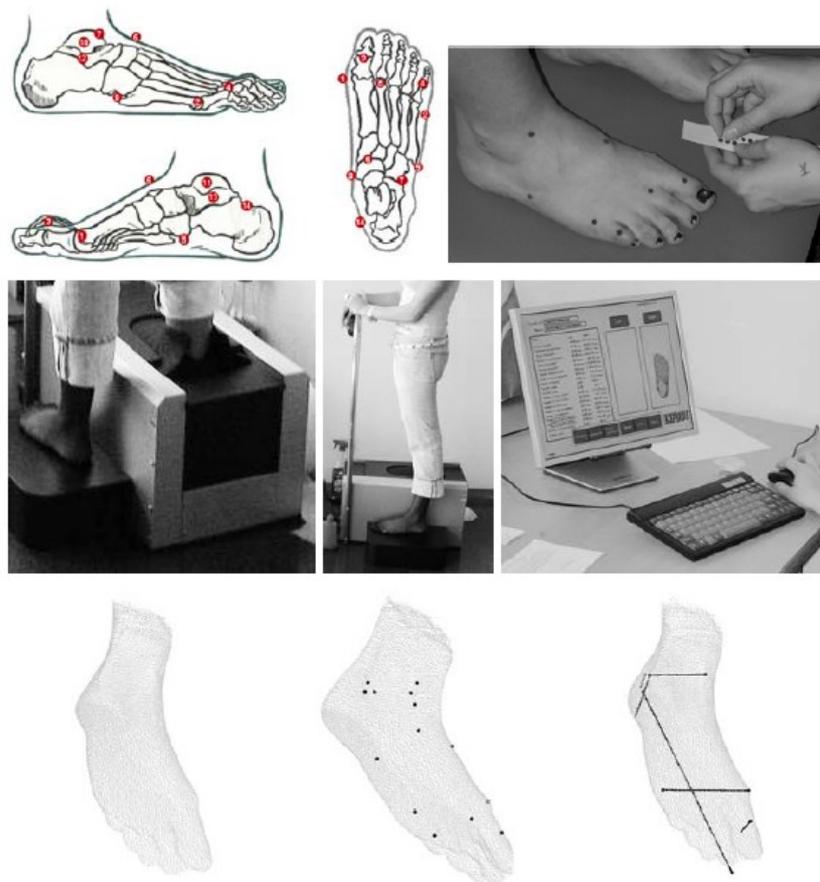


Figura 2.1. Acquisizione della forma in 3D del piede. In alto a sinistra: localizzazione dei 14 marcatori. In alto a destra: collocamento manuale degli adesivi. Al centro: posizionamento e orientamento del piede per la fase di scanner. In basso: risultato del processo, nuvola di punti 3D e posizionamento assi cartesiani.

Il procedimento comincia con il collocamento manuale dei marcatori adesivi su 14 punti dislocati sulle prominenze dell'osso o sulle zone critiche per la calzata delle scarpe.

La localizzazione dei 14 punti è stata così definita:

1) Metatarsale Tibiale, 2) Metatarsale Fibulare, 3) Il punto più alto del primo dito nella giuntura interfalangeale, 4) Il punto più alto della giuntura del quinto dito alla giuntura interfalangeale distale, 5) Testa del secondo metatarso, 6) Punto del collo del piede, 7) Punto della giunzione provvisoria, 8) Navicolare, 9) Tuberosità del quinto metatarso, 10) Il punto più laterale del malleolo laterale, 11) Il punto più mediale del malleolo mediale, 12) Sfirion Fibulare, 13) Sfirion, 14) Punto superiore del tallone mediale.

Grazie alla localizzazione di questi 14 punti chiave, è possibile eseguire delle misure d'interesse sul piede, in questo caso: la lunghezza del piede, la larghezza dell'avampiede, la larghezza del calcagno, l'altezza del collo del piede, l'altezza del primo dito e l'altezza del malleolo laterale. Il significato di tali misure è riportato nel paragrafo a seguire. La misurazione ha luogo mentre il partecipante sta dritto, con il peso egualmente distribuito su ciascun piede, in un certa posizione e un certo orientamento. Il risultato consiste in: a) una nuvola di punti che rappresentano la superficie esterna del piede; b) la posizione dei 14 marcatori; c) un certo numero di misure podometriche derivate dai 14 marcatori.

Variabili podometriche	Min	Media	Max	S. D.
Lunghezza del piede	225.9	241.77	257.6	±5.82
Larghezza dell'avampiede	84.5	94.07	106.4	±3.95
Larghezza del tallone	55.2	61.44	70.5	±2.88
Altezza del collo del piede	51.8	62.56	80.8	±4.29
Altezza del primo dito	7.6	16.92	27.7	±3.43
Altezza del malleolo esterno	49.9	64.52	122.7	±7.93

Tabella 2.1. Statistiche descrittive in mm delle forme 3D acquisite

In Tabella 2.1 sono rappresentate delle statistiche descrittive sul processo di acquisizione. Le differenze più consistenti sono osservate sulle misure dell'altezza del malleolo esterno e sulla lunghezza del piede. Il secondo passo è quello di compilare il questionario sulle quattro scarpe calzate, su otto possibili, designate come campione rappresentativo del mercato attuale. Dopo aver camminato per circa due minuti il soggetto era quindi tenuto a dare un'opinione sulla calzabilità in 15

differenti zone del piede, concretizzata con una scala di quattro valori, (0=nulla, 1=bassa, 2=media, 3=alta). Inoltre il partecipante ha risposto a domande generali sul comfort globale e sulle preferenze delle calzature. Con queste valutazioni è stata compilata una seconda tabella che esprime media e deviazione standard sul comfort, variabile per ciascun modello di scarpa e zona del piede, al fine di valutarne la relazione con i parametri morfometrici. Il metodo di posizionamento classico richiede la presenza di un esperto, che posiziona manualmente i marcatori. Tale posizionamento, ottenuto da differenti esperti, o dallo stesso in diversi momenti, può essere significativamente diverso.

2.1.2 Tecnica automatica

La soggettività del posizionamento dei marcatori viene superata dall'introduzione di un nuovo metodo che propone una tecnica automatica per questo scopo. La tecnica proposta fa posizionare automaticamente allo scanner gli assi di riferimento mostrati in Figura 2.2. I punti trovati dalla ricerca automatica sono : 1) *Metatarsale Tibiale*, 2) *Metatarsale Fibulare*, 6) *Punto del collo del piede (cuneiforme)*, 10) *Il punto più laterale del malleolo laterale*, 11) *Il punto più mediale del malleolo mediale*, 12) *Sfirion Fibulare*, 13) *Sfirion*, 15) *Il punto più laterale del 5° dito*, 16) *Inserimento del tendine di Achille nel calcagno*, 17) *Il punto più posteriore del calcagno*, 18) *Il punto più alto del primo dito*, 19) *Punto più prominente del calcagno esterno*, 20) *Punto più prominente del calcagno interno* e 21) *Punto più avanzato del 2° dito*. I numeri da 1 a 14 sono quelli usati anche nel metodo manuale. La tecnica proposta è euristica, e prende in considerazione il fatto che lo scanner posiziona automaticamente gli assi di riferimento mostrati in Figura 2.2. Inizialmente viene svolta una ricerca dei marcatori su tutta la nuvola di punti 3D, e per prima cosa vengono selezionati una serie di punti di riferimento, che includono i punti 6, 16, 17 e 21 in alto a destra e in centro della Figura 2.2. Il punto 17 è quello con coordinata x minore, 21 quello con coordinata y =0, z=0 e la maggior coordinata x. Il set di punti individuati inizialmente consentono di dividere la nuvola lungo gli assi x e z, in tre sotto nuvole, alta, bassa posteriore e bassa anteriore.

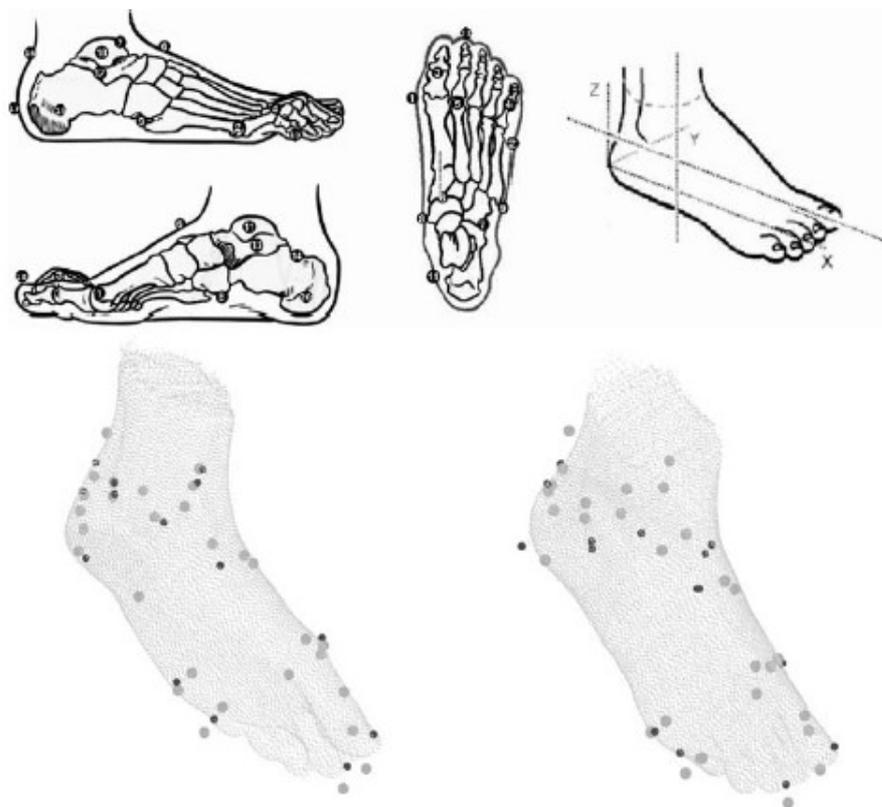


Figura 2.2. Ricerca automatica dei punti di riferimento. In alto a destra sono raffigurati gli assi di riferimento. In basso: confronto tra i punti trovati dal metodo automatico e manuale.

In queste nuvole sono localizzati il resto dei punti, ad esempio nella sotto-nuvola posteriore in basso i punti 19 e 20, rispettivamente nei punti di minore e maggiore coordinata y . Sono localizzati di seguito 1, 2, 15, e 18 nella sotto-nuvola anteriore in basso e così via. È da notare che la maggior parte dei punti selezionati sono punti di confine, per questo essi hanno coordinate massime e minime negli assi delle sotto nuvole. Solamente i punti 6, 12, 13 e 16 non sono punti di confine. Non tutti i punti tracciati automaticamente corrispondono a quelli tracciati manualmente, infatti non tutti i punti tracciati manualmente sono investigati. Tra questi i punti 8 e 9 richiedono un'investigazione manuale essendo punti di giuntura tra due ossa. La comparazione quindi dei due risultati può essere ottenuta tramite quei punti che appartengono ad

entrambe le tecniche. Per l'interpretazione statistica sono state definite tre distanze, L1 e L2, corrispondenti a distanze Euclidee e l'errore quadratico medio (MSE). Le distanze L1 e L2 ottenute dalle distanze manuali x e dalle corrispondenti distanze automatiche y sono mostrate nelle equazioni seguenti.

$$L_1(x, y) = |x_1 - y_1| + |x_2 - y_2| + |x_3 - y_3|$$

$$L_2(x, y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + (x_3 - y_3)^2}$$

$$MSE(X, Y) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}}$$

I risultati mostrati in Tabella 2.2 sono le distanze in media. L' MSE dal set di valori osservati (posizionamento manuale) $X=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ a quello dei valori calcolati (posizionamento automatico) $Y=(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$ è dato dalla terza equazione.

Point	L_1	L_2	MSE
Lateral malleolus (10)	33.68	22.39	5.8
External heel (19)	60.63	46.18	7.78
Medial malleolus (11)	43.77	30.02	6.62
Internal heel (20)	41.89	29.80	6.47
Heel rear (17)	18.15	14.01	4.26
Total	39.62	28.48	6.19

Tabella 2.2. Differenti tassi di errore (in mm) per ciascun punto di intersezione e tasso di errore totale. I numeri corrispondono con quelli della Figura 2.2.

In Figura 2.3 sono presentati due esempi di applicazioni automatiche comparati con quelle manuali, nella figura di destra si nota una corrispondenza, mentre in quella di sinistra i punti non sono stati correttamente posizionati. Si deduce allora che il posizionamento automatico può essere utilizzato per tracciare una serie di punti completa delle caratteristiche podometriche in Tabella 2.1.



Figura 2.3. Confronto tra posizionamento manuale e automatico.

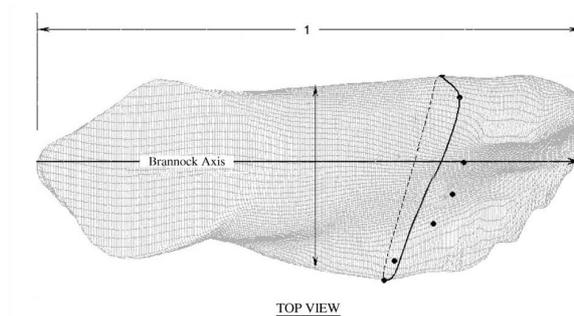
E' così stato realizzato un database del piede, che comprende immagini 3D delle forme e resoconti sulla calzabilità ad esso relativa. È chiamato MORFO3D e ha un doppio uso, studiare la calzabilità in modo indiretto e allo stesso tempo è un'analisi accurata dell'anatomia del piede. Tale tecnica che introduce la determinazione automatica dei punti di riferimento ha condotto a buoni risultati.

2.2 Definizione dei parametri antropometrici utilizzati per valutare la geometria esterna del piede

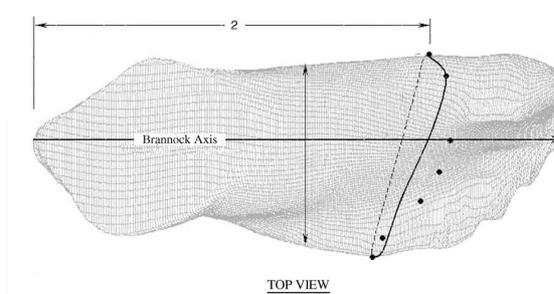
Una volta chiarite le tecniche e i vari approcci all'analisi morfometrica, è interessante proporre un elenco, e le relative definizioni, dei parametri che sembrano più significativi al fine di valutare il piede. I dati antropometrici presentati possono essere così riassunti :

Definendo l'asse di Brannock come l'asse che taglia a metà il piede in direzione posteriore-anteriore, i parametri relativi alle lunghezze del piede sono:

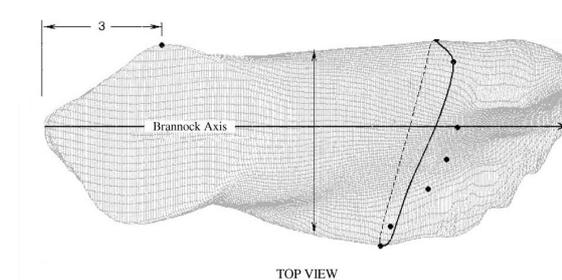
- 1. Lunghezza del piede** : la distanza lungo l'asse di Brannock (direzione X) dalla parte posteriore del tallone fino alla punta del dito più lungo.



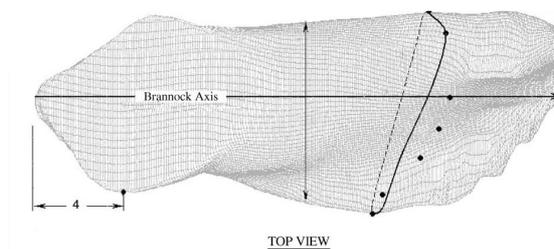
2. Lunghezza dell'arco : la distanza lungo l'asse Brannock (direzione X) dalla parte posteriore del tallone alla prominenza più mediale nella prima testa metatarsale.



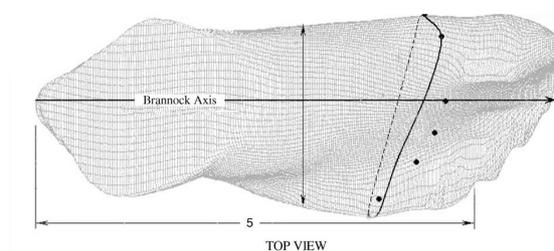
3. Distanza tra tallone e malleolo mediale : è la lunghezza dalla parte posteriore del tallone alla protuberanza più mediale del malleolo misurata lungo l'asse di Brannock.



4. Distanza dal tallone al malleolo laterale : è la lunghezza dalla parte posteriore del tallone alla protuberanza più laterale del malleolo misurata lungo l'asse di Brannock.

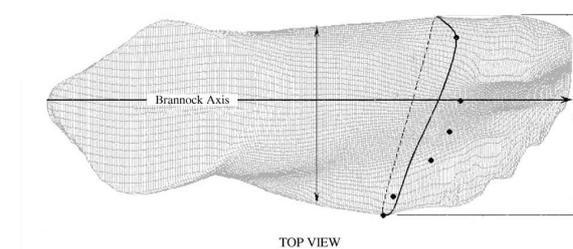


5. Tallone-quinto dito : la distanza lungo l'asse di Brannock dalla parte posteriore del tallone fino alla parte anteriore del quinto dito.

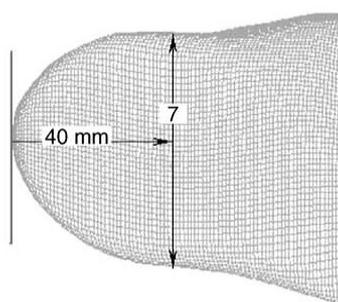


Parametri relativi alle ampiezze del piede

6. Larghezza del piede.: massima larghezza (direzione Y) lungo la perpendicolare all'asse di Brannock in corrispondenza della prominenza più laterale della quinta testa metatarsale.

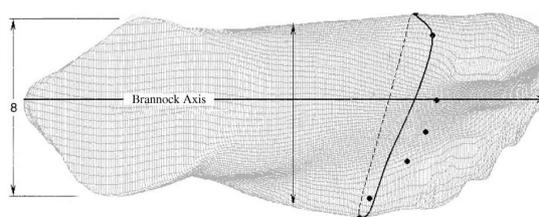


7. Larghezza del tallone : larghezza del tallone a 40 mm dal punto più posteriore del tallone.



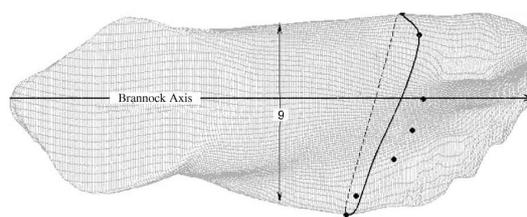
BOTTOM VIEW

8. Larghezza bimalleolare : distanza dalla protuberanza più mediale del malleolo alla protuberanza più laterale del malleolo misurata in una linea perpendicolare all'asse di Brannock.



TOP VIEW

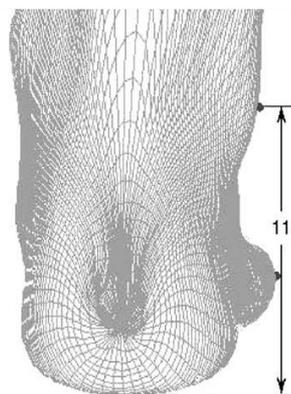
9. Larghezza del mesopiede : massima larghezza, calcolata lungo la perpendicolare all'asse di Brannock al 50% dal punto posteriore del tallone.



TOP VIEW

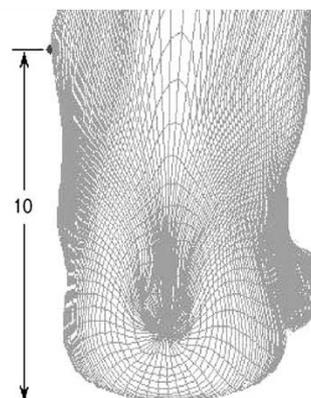
Parametri relativi alle altezze

10. Altezza del malleolo mediale : distanza verticale (direzione Z) dal suolo al punto più prominente del malleolo mediale.



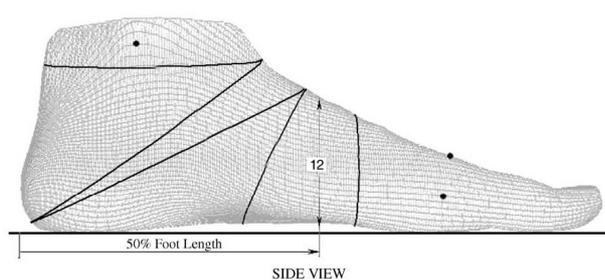
BACK VIEW

11. Altezza del malleolo laterale : distanza verticale (direzione-Z) dal suolo al punto più prominente del malleolo laterale.



BACK VIEW

12. Altezza del mesopiede : massima altezza della sezione verticale al 50% della lunghezza del piede dal tallone posteriore.

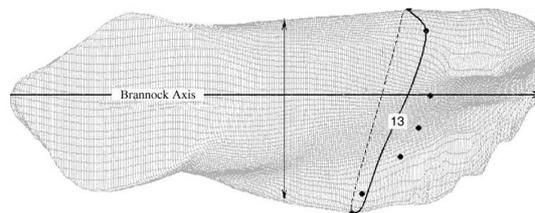


SIDE VIEW

Parametri relativi alle circonferenze

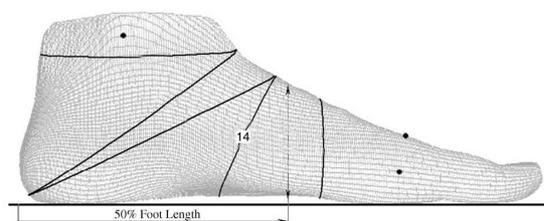
13. Circonferenza della sfera : la più piccola circonferenza, tangente al margine mediale della testa del primo osso metatarsale, alla sommità

dell'osso del primo metatarso e al margine laterale della testa del quinto metatarso.



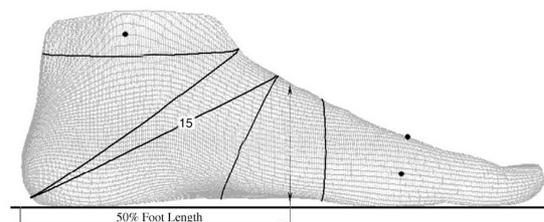
TOP VIEW

14. Circonferenza del collo del piede : la più piccola circonferenza oltre la prominenza del cuneiforme mediano.



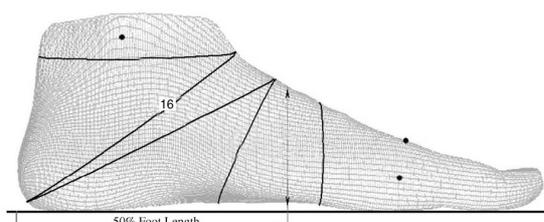
SIDE VIEW

15. Circonferenza lunga del tallone : la circonferenza dal punto del collo del piede attorno al retro del tallone.



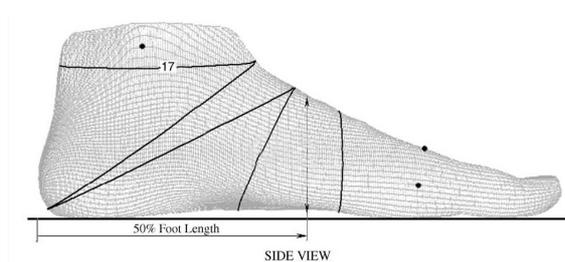
SIDE VIEW

16. Circonferenza corta del tallone : la circonferenza minima attorno al retro del tallone e alla superficie dorsale del piede.

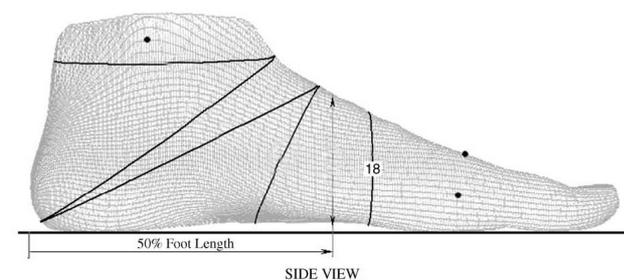


SIDE VIEW

17. Circonferenza della caviglia : circonferenza orizzontale all'intersezione tra gamba e piede.



18. Circonferenza delle dita : circonferenza sul centro approssimativo dei metatarsi, misurata in un piano verticale, perpendicolare all'asse di Brannock.



Usando una tecnica di misurazione automatica, i risultati ottenuti per tali grandezze sono riportati in Tabella 2.3. I dati appartengono ad un campione così distribuito :

Grandezza	Media	Max	Min	S.D.
Età (anni)	21,25	23	19	1,16
Altezza (cm)	166,0	178,0	155,3	7,44
Peso (kg)	58,26	94,25	41,8	13,36

Tabella 2.3. Distribuzione del campione per età altezza e peso corporeo.

I dati raccolti sono i seguenti :

Grandezze	Media	SD
Lunghezze (mm)		
1	250.6	12.7
2	183.3	9.7
3	61.4	5.8
4	53.0	4.9
5	202.6	9.6
Larghezze (mm)		
6	97.2	6.1
7	65.4	4.2
8	68.5	4.7
9	91.6	6.7
Altezze (mm)		
10	76.6	4.7
11	65.7	6.2
12	60.6	4.8
Circonferenze (mm)		
13	239.5	13.2
14	247.5	15.0
15	336.4	17.4
16	314.5	17.4
17	248.7	13.5
18	239.1	14.0

Tabella 2.4. Valori medi per i 18 parametri d'interesse. I dati sono riportati in mm.

2.3 Valutazioni delle grandezze antropometriche con possibili confronti

Il piede umano ha un'ampia gamma di possibili variazioni di misura, forma e proporzioni, sia nel piede di una singola persona che nel confronto tra soggetti distinti. Nello stesso piede la forma può variare in base alle diverse condizioni: carico o scarico, variazioni di funzionalità e temperatura. Il piede normalmente accresce la sua forma e la sua misura mentre viene caricato (posizione eretta) e invece le diminuisce in condizioni di scarico (piedi alzati) o in posizione di mezzo carico (seduti). Nel suo studio su 6.800 persone, Rossi scoprì che in condizioni di carico indotto o del semplice peso corporeo nell' 80% delle persone un piede era più

lungo dell'altro e che per il restante 20% entrambi i piedi si allungavano della stessa quantità. Infatti le dimensioni che normalmente aumentano in modo più evidente sono lunghezza e larghezza. La funzionalità del piede è divisa in due principali condizioni : statica e dinamica. Daanen et al. (2000) hanno mostrato che c'è una differenza anche di 2 mm nella forma del piede durante l'assunzione di una postura in avanti o all'indietro. Ciò è dovuto ai molteplici movimenti che si hanno alle giunzioni sub-talare, medio-tarsale, metatarsale-falangeale e falangeale-falangeale e della caviglia. Tali giunzioni permettono differenti gruppi di movimenti e perciò la forma del piede cambia. All'altezza della caviglia un meccanismo a cardine permette la dorsiflessione (movimento verso l'alto) e la flessione plantare (movimento verso il basso) come in Figura 2.4. Le giunzioni sub-talari e medio-tarsali giocano un ruolo predominante nella supinazione e pronazione. La pronazione è composta da tre movimenti, eversione, abduzione e dorsiflessione ed è presente nella stazione eretta e nel movimento. La supinazione, è composta da inversione, adduzione e flessione plantare. La giunzione metatarsale-falangeale è un tipo di giuntura che permette la dorsiflessione e flessione plantare delle dita. In più, la giunzione falangeale-falangeale è un ginglymo e permette la presa alle dita.

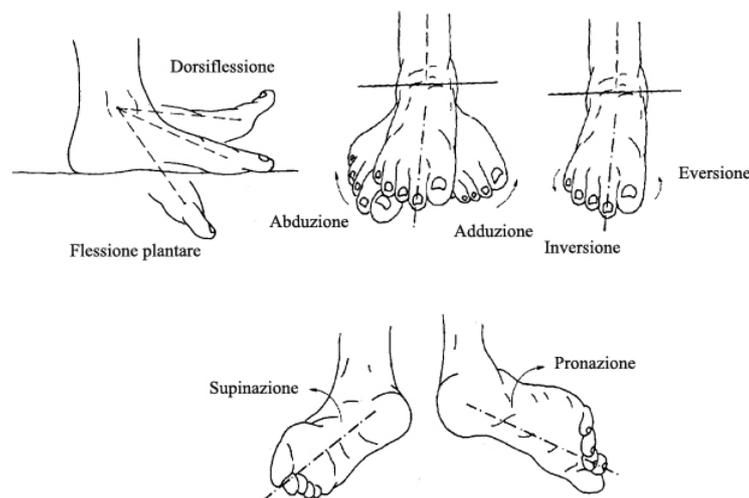


Figura 2.4. In alto a sinistra sono raffigurati i movimenti di flessione dorsale e plantare, al centro l'abduzione e l'adduzione, a destra eversione ed inversione. In basso supinazione e pronazione.

2.3.1 Variazioni morfometriche dovute al genere

Differenti studi hanno dimostrato che la morfometria varia tra uomo e donna. È allora interessante soffermarsi su questo punto e analizzare in che modo differiscano i parametri sopra definiti in questi due gruppi. I dati qui presentati provengono da uno studio svolto sulla popolazione militare, che riassume 26 studi antropometrici avvenuti tra il 1942 e il 1977, di cui 19 serie di misure svolte sui piedi di uomini e 7 serie su piedi di donne, per un totale di 81.000 individui. Tali dati riassumono variazioni che dipendono dal genere, dall'età, e dalla popolazione. Sono stati presi da un resoconto “Comparative anthropometry of the foot”, di Robert M. White. Informazioni più specifiche sono riportate in Appendice A. Secondo questi dati, la lunghezza media del piede di una donna risulta essere circa il 91% di quella di un uomo, mentre il volume medio è l' 81%. Questa differenza inizia già a delinearsi in tenera età, in bambini tra i 6 e gli 11 anni, che si dimostra abbiano il piede più largo e lungo rispetto alle coetanee. Il sommario dei dati raccolti, mette in evidenza come le misure del piede dell'uomo siano, in tutti e sette i parametri presi in considerazione per quest'analisi, maggiori rispetto a quelle delle donne. I 7 parametri sono : lunghezza del piede, larghezza del collo del piede, larghezza del piede, larghezza del tallone, circonferenza della sfera, circonferenza del collo del piede, circonferenza caviglia tallone.

In media la *lunghezza del piede* della donna è minore di 2,46 cm; la *lunghezza del collo del piede* è minore di 1,79 cm; la *larghezza del piede* si discosta di 0,97 cm, la *larghezza del tallone* di 0,77. Similmente, la *circonferenza della sfera* è 2,41 cm minore nella donna; la *circonferenza del collo del piede* è minore di 3,08 cm e la *circonferenza caviglia-tallone* di 3,32 cm. Le misure nella donna presentano una deviazione standard minore e anche un minor range. Come si può dedurre dalle Tabelle 2.5 e 2.6.

Parametri considerati al fine di valutare la morfometria del piede

No.	Misure	Valori in Centimetri						Rapporto di altezza
		N	Media	S.D.	Range		Totale	
					Min.	Max.		
1	Lunghezza del piede							
	Uomini (1966)	6682	26.78	1.30	21.4	32.3	10.9	.153
	Donne (1977)	1330	24.32	1.25	20.9	29.8	8.9	.149
	Combinata Uomini e Donne	8012	26.37	1.58	20.9	32.3	11.4	.153
2	Lunghezza del collo del piede							
	Uomini (1966)	6682	19.64	1.05	16.2	24.5	8.3	.113
	Donne (1977)	1330	17.85	0.99	15.0	21.5	6.5	.110
	Combinata Uomini e Donne	8012	19.34	1.23	15.0	24.5	9.5	.112
3	Larghezza del piede							
	Uomini (1966)	6682	9.84	0.55	8.0	12.2	4.2	.056
	Donne (1977)	1330	8.87	0.52	7.5	10.8	3.3	.054
	Combinata Uomini e Donne	8012	9.68	0.65	7.5	12.2	4.7	.056
4	Larghezza del tallone							
	Uomini (1966)	6682	6.86	0.47	5.1	9.0	3.9	.039
	Donne (1977)	1330	6.09	0.41	5.0	7.6	2.6	.037
	Combinata Uomini e Donne	8012	6.73	0.54	5.0	9.0	4.0	.039

Tabella 2.5. Valori della lunghezza del piede, lunghezza del collo del piede, ampiezza del piede, ampiezza del tallone per uomini e donne dell'esercito americano. Sono riportate media e deviazione standard.

No.	Misurazioni	Valori in Centimetri						Rapporto di altezza
		N	Media	S.D.	Range		Totale	
					Min.	Max.		
5	Cinconfenza della sfera del piede							
	Uomini (1966)	6682	25.02	1.48	18.6	31.3	12.7	.143
	Donne (1977)	1330	22.61	1.14	19.5	27.2	7.7	.139
	Combinata Uomini e Donne	8012	24.62	1.69	18.6	31.3	12.7	.143
6	Circonfenza del collo del piede							
	Uomini (1966)	6682	26.56	1.65	20.5	36.0	15.5	.152
	Donne (1977)	1330	23.48	1.26	20.1	27.7	7.6	.144
	Combinata Uomini e Donne	8012	26.05	1.96	20.1	36.0	15.9	.151
7	Cinconfenza tallone-caviglia							
	Uomini (1966)	6682	34.11	1.66	28.2	40.5	12.3	.195
	Donne (1977)	1330	30.79	1.46	26.8	36.1	9.3	.189
	Combinata Uomini e Donne	8012	33.56	2.04	26.8	40.5	13.7	.194

Tabella 2.6. Valori della circonferenza del piede, della circonferenza del collo del piede, e della circonferenza tallone caviglia, per uomini e donne dell'esercito americano. Sono riportate media e deviazione standard, range e rapporto di altezza.

Lo studio delle differenze anatomiche nel piede tra uomo e donna si estende a valutazioni su tavole bivariate, dove sono messe in relazione a due a due le varie misure per stabilirne una correlazione. La differenza tra i dati raccolti per questi due gruppi (donne e uomini) risulta evidente, più sottile invece è l'analisi da svolgere per quanto riguarda la variabilità dei parametri con il progredire dell'età.

2.3.2 Variazioni morfometriche dovute all'età

Il piede cessa di crescere attorno all'età di 14 anni nei ragazzi e di 13 anni nelle ragazze. Secondo alcuni autori, non si dovrebbero quindi riscontrare grandi differenze nelle misure antropometriche dopo tale periodo. Secondo altri studi svolti all'Università di Torino dal professor Paolo Olivato e colleghi, risulterebbero esserci delle differenze per quanto riguarda alcuni indici, cioè nei rapporti tra le misure.

Vengono così definiti :

- Rapporto tra lunghezza e larghezza del piede (L_B)
- Rapporto tra la lunghezza del piede e la larghezza del tallone (_L_Hb)
- Rapporto tra la lunghezza del piede e l'altezza media della parte anteriore del piede (L_Mforeh)
- Rapporto tra la larghezza del piede e l'altezza media della parte anteriore del piede (B_Mforeh)
- Rapporto tra la larghezza laterale (distanza tra 5° metatarso e asse trasversale) e mediale (distanza tra 1° metatarso e asse trasversale) del piede (Lat_Med)

Grandezze	15-20 (N=17)	21-35 (N=117)	36-50 (N=103)	51-70 (N=71)	71-80 (N=5)
L_Hb		3.8410	3.7676	3.6105	
L_Mforeh		6.1394	6.0030	5.8758	
Lat_med		0.9740	0.9898	1.0600	

Tabella 2.7. Confronto dei parametri L_Hb, L_Mforeh, Lat_med in base al cambiamento d'età.

Guardando la tabella si nota come L_Hb tenda a decrescere con l'età, come anche l'indice L_Mforeh forse per la tendenza a collassare degli archi. Invece si nota un incremento del rapporto tra lunghezza laterale e mediale.

2.3.3 Variazioni morfometriche dovute all'etnia di appartenenza

Mentre tutti gli esseri umani mostrano caratteristiche comuni nell'anatomia del piede, la morfometria del piede può variare e differire in certa misura tra individui appartenenti a popolazioni diverse. Tali differenze sussistono quindi tra i vari gruppi etnici (Hayafune et al., 1999). Ad esempio Gottschalk et al. (1980) hanno trovato una differenza di incidenza di alluce valgo tra le donne sudafricane bianche e nere. In termini di funzione del piede, Vêves et al. (1995) hanno mostrato che il diabete negli afro-americani e nei caucasici-americani differiva nella mobilità delle articolazioni del piede, così come nel carico plantare. Differenze nella struttura del piede e caratteristiche di caricamento tra le etnie sono di grande importanza quando sono presi in considerazione i problemi di progettazione delle scarpe. Hawes et al. (1994) hanno trovato che caucasici-americani differiscono nella larghezza dell'avampiede rispetto ai soggetti giapponesi e coreani, una constatazione che ha notevoli implicazioni per lo sviluppo delle forme delle calzature. In generale, si può notare che il piede nella popolazione di colore è largo nella parte anteriore e stretto nella parte del tallone; il piede orientale è corto e largo nella parte anteriore e posteriore; il piede caucasico è abbastanza largo ma con le dita dritte. Nonostante già da molto tempo sia stato ipotizzato che la funzione e la morfometria del piede differiscono tra le etnie, tuttavia, la ricerca quantitativa che tenta di provare, o confutare, questa affermazione è svolta su un campione disperso nei continenti e in maniera non omogenea. Al fine di ottenere un confronto tra i dati antropometrici di popolazioni diverse, sono stati valutati quattro studi sulla popolazione europea, americana e cinese. I dati riguardanti la popolazione europea presentati sono stati raccolti all'Istituto di Biomeccanica di Valencia ad opera di Josè Garsia Hernández et al. Per quanto riguarda i dati sulla popolazione civile e militare americana vengono riportati i risultati raccolti da due autori diversi : Hawea et al., Freedman et al e sono composti come in tabella 2.8.

	Americani civili		Americani militari	
	Hawes et al.		Freedman et al.	
Grandezze	Media	SD	Media	SD
Età	35.47	11.85	22.80	
Numero soggetti	1197	0	5575	
Statura	176.71	6.54		
Massa	77.31	10.44		

Tabella 2.8. Composizione del campione dei soldati e dei civili americani.

Il campione sulla popolazione cinese si riferisce a 50 soggetti tra staff e studenti dell'Università della Scienza e della Tecnica di Hong Kong, distribuito come in Tabella 2.9.

Grandezza	Media	SD
Peso (Kg)	66.2	11.26
Altezza (cm)	1720.0	62.71

Tabella 2.9. Caratterizzazione del campione di popolazione cinese.

Parham et al. hanno svolto uno studio sui soldati americani, distinguendo tra uomini e donne su un campione così distribuito:

Età	Maschi	Femmine
< 20	182	282
21-24	37	117
25-30	39	61
> 31	35	31
Età media	22.3	21.6

Tabella 2.10. Caratterizzazione del campione di popolazione americana in base al genere.

Ed è inoltre suddiviso nelle popolazioni di provenienza in Tabella 2.11. Non sempre autori diversi riportano gli stessi parametri morfometrici, i quali variano in base agli

scopi di ciascuno studio. Per questo motivo eseguire dei confronti coerenti risulta difficile per la mancanza di uniformità nella raccolta di dati.

Provenienza	Uomini	Donne
Bianchi	178	253
Neri	78	194
Ispanici	24	30
Asiatici	9	8
Nativi americani	4	6

Tabella 2.11. Suddivisione in base alla provenienza.

È di seguito proposta una tabella con lo scopo di riassumere i risultati degli studi sopra citati e di mettere in luce le differenze dei vari parametri morfometrici tra le varie popolazioni.

In Tabella 2.11 sono stati utilizzati parametri morfometrici che non erano stati definiti nell'elenco generale proposto nel secondo paragrafo. Tali parametri sono :

- *Altezza del primo dito*, altezza misurata dal suolo fino alla parte più alta del primo dito.

Autore	J.G. Hernandez	Ameersing	Parham et al.	Hawes et al.	Freedman et al.
Provenienza	europèi	cinesi	americani	americani	americani
				civili	soldati
Grandezze	Media (cm)	Media (cm)	Media (cm)	Media (cm)	Media (cm)
Lungh.piede	24,18	25,46	25,67		
Lungh. Arco		18,49			
Lungh. primo dito		25,41			
Lungh.bimalleolare			6,92		
Lunghezza collo del piede					
Largh. piede	9,4	9,32	9,62	9,91	9,80
Largh. Tallone		6,56	6,68	6,3	6,69
Largh. Al 50%		8,23			
Spessore caviglia	6,144				
Altezza collo del piede	6,26				
Altezza primo dito	1,69	1,77	2,07		
Altezza malleolo mediale	6,45		7,65		
Altezza malleolo laterale			6,93		
Altezza dell'arco		3,06	2,96	2,12	2,83
Circonferenza tallone caviglia			32,59		
Circonferenza collo del piede			24,68		

Tabella 2.12. Confronto tra cinque autori che riportano i parametri morfometrici di interesse.

I parametri sui quali è possibile eseguire un confronto sono :

- *Lunghezza del piede*, che sembra essere maggiore nella popolazione americana con una media del 25,67 cm mediata tra uomini e donne, pur essendo la differenza quasi trascurabile. È invece più significativa la differenza tra la media sulla popolazione cinese (25,46 cm) e quella europea (24,18 cm), che è pari a 1,28 cm.
- *Larghezza del tallone* per la quale, una volta mediati i dati tra uomini e donne, civili e militari non sembra esservi discordanza.
- *L'altezza del primo dito* che risulta essere minore per gli europei (1,69 cm) e maggiore per gli americani (non scende sotto 1,94 cm).

2.3.3.1 Variazioni morfometriche in gruppi di atleti

Su tali argomenti sono stati raccolti dati da ricercatori che hanno svolto uno studio su un gruppo di atleti appartenenti ad una squadra di rugby, provenienti da diverse etnie. Questi dati risultano utili per gli studi e per le ricerche sugli effetti della provenienza, e per approfondire le conoscenze sui parametri di interesse in generale. Lo scopo di questo studio era di confrontare la morfometria e la distribuzione pressoria in atleti di élite di tre diverse etnie: caucasica, maori e isole del Pacifico. I risultati ottenuti hanno evidenziato, come previsto, un certo numero di differenze significative nel carico plantare e nel modello geometrico.

Per la caratterizzazione geometrica sono stati scelti i seguenti parametri: *l'indice dell'arco*, *il coefficiente di diffusione*, *l'angolo dell'alluce* e *l'angolo di sotto-arco*.

L'indice dell'arco (AI) è definito dal rapporto tra la superficie mediale del piede divisa per la superficie totale del piede, escluse le dita.

La larghezza normalizzata (Co) è calcolato come la larghezza dell'avampiede (C) divisa per la lunghezza del piede.

L'angolo dell'alluce (HA) è l'angolo creato dalla deviazione dell'alluce (D) dalla linea tangente che connette la parte mediale del tallone con la parte mediale

dell'avampiede (B).

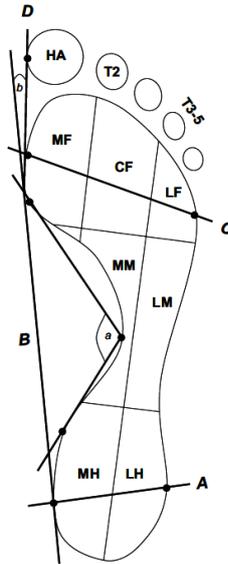


Figura 2.5. PRC maschera; [HA] alluce; [T2] secondo dito; [T3-5] dal terzo al quinto dito; [MF] avampiede mediale; [CF] avampiede centrale; [LF] avampiede laterale; [MM] mesopiede mediale; [ML] mesopiede laterale; [MH] retropiede mediale; [LH] retropiede laterale. Linee geometriche [A, B, C, D] usate per calcolare l'indice dell'arco, la larghezza normalizzata e varie altezze e ampiezze. a) angolo di sotto arco; b) angolo dell'alluce.

L'angolo di sotto-arco (SA) esprime l'angolo creato dall'arco tra l'avampiede e il tallone, con punto di origine al bordo mediale della parte più stretta del mesopiede.

Lunghezza del piede (FL), la larghezza avampiede (FW) e la larghezza del tallone sono state misurate utilizzando il software Novel (Novel GmbH, Monaco di Baviera, Germania).

Da tali valutazioni e dai confronti tra questi parametri risulta che i soggetti *caucasici* e *maori* hanno un'avampiede più ampia in proporzione alla lunghezza del piede rispetto agli abitanti delle *isole del Pacifico*, come indicato dalla **larghezza normalizzata** (C = 0,37, M = 0,37, PI = 0,36, dove C=caucasici, M=maori, PI=isole del Pacifico). I piedi *caucasici* e *maori* hanno un **indice dell'arco** significativamente più basso rispetto ai piedi delle isole del Pacifico, nel senso che il mesopiede comprende una percentuale di contatto dell'intero piede minore rispetto alle altre due etnie (C = 0,24, M = 0,25, Pi = 0,27).

	Caucasici		Maori		Isole del Pacifico		Differenze significative	
	Media	SD	Media	SD	Media	SD		
N	9	-	7	-	12	-	-	-
Età	22.6	2.67	21.9	3.53	22.25	2.57	-	-
BMI	29.18	2.88	29.57	1.09	30.75	2.01	C - PI*	
CoS	0.37	0.02	0.37	0.02	0.36	0.02	C - PI* M - PI**	
AI	0.25	0.03	0.25	0.04	0.27	0.05	C - PI** M - PI**	
HA [°]	2.76	5.67	4.29	4.62	7.74	6.21	C - PI** M - PI**	
HW [cm]	6.11	0.39	5.97	0.35	6.29	0.50	C - M* C - PI** M - PI**	
SA [°]	104.96	13.31	101.45	10.27	117.44	22.22	C - PI** M - PI**	
FW [cm]	10.77	0.67	10.70	0.60	10.96	0.50	C - PI* M - PI**	
FL [cm]	29.17	1.36	28.75	1.22	30.19	0.89	C - M* C - PI** M - PI**	

Tabella 2.13. N = numero di soggetti; BMI = indice della massa corporea; CoS = larghezza normalizzata; AI = indice dell'arco; HA = angolo dell'alluce; HW = larghezza del tallone; SA = angolo del sotto arco; FW = larghezza dell'avampiede; FL = lunghezza del piede. Dove si hanno misure significative viene riportato l'asterisco, * $p < 0.05$ and ** $p < 0.01$.

L'angolo dell'alluce risulta essere significativamente maggiore nel piede delle *isole del Pacifico* rispetto ai *caucasici* e piedi *maori* ($C = 2,76^\circ$, $M = 4,3^\circ$, $PI = 7,7^\circ$), così come per **l'angolo del sotto-arco** ($C = 105^\circ$, $M = 100,3^\circ$, $PI = 117,2$). Il piede degli abitanti delle *isole del Pacifico* ha un avampiede significativamente più ampio di quello *caucasico* e del piede *maori* ($C = 10,8$ cm, $M = 10,7$ cm, $PI = 11,0$ cm). Differenze significative sono state osservate tra tutte le tre etnie nella **larghezza del tallone** ($C = 6.1$ cm, $M = 6.0$ cm, $PI = 6.3$ cm) e **lunghezza del piede** ($C = 29,2$ centimetri, $M = 28,7$ cm, $PI = 30,2$ cm), e il piede delle *isole pacifiche* risultata significativamente maggiore in entrambi i parametri della tabella.

Il piede delle *isole del Pacifico* è caratterizzato da :

- avampiede e un tallone notevolmente più ampi
- una lunghezza del piede maggiore
- indici di arco e sotto-arco aumentati
- un angolo di alluce maggiore

rispetto a quelli del piede *caucasico* e *maori*.

Tuttavia il *piede caucasico* e *quello maori* hanno :

- una superficie più ampia rispetto a quella totale del piede delle isole del

pacifico, pur essendo più ristretto in termini assoluti.

Tali risultati portano alla conclusione che il piede degli abitanti delle *isole del Pacifico* ha un profilo più ampio e più piatto per tutta la lunghezza del piede. Un risultato particolarmente interessante è stato notare la differenza dell'**angolo dell'alluce** tra etnie ($C = 2,76^\circ$, $M = 4.3^\circ$, $PI = 7,7^\circ$). Il piede degli abitanti delle *isole del Pacifico* ha dimostrato un **angolo di alluce** notevolmente superiore sia rispetto al *caucasico* e al piede *maori*. I piedi *maori* hanno dimostrato un angolo di alluce quasi doppio di quello del piede del *caucasico* ma questo rapporto non era statisticamente significativo. Questi risultati sono in contrasto con Gottschalk et al. (1984) che non hanno trovato alcuna differenza, tra gli angoli di alluce valgo, tra maschi sudafricani bianchi e neri. È possibile che l'alluce valgo sia un tratto tipico nei piedi polinesiani, forse a causa di una predisposizione genetica o dell'ambiente, ma sarebbe necessario un campione più forbitato per determinarlo. I risultati di questa ricerca suggeriscono inoltre che i modelli di carico plantare durante il passo può variare tra etnie. Mentre i soggetti *caucasici* sembrano caricare le dita dei piedi molto più dei *maori* e dei soggetti delle *isole del Pacifico*, quest'ultimi sembravano caricare la metà anteriore del piede e le regioni molto più dei soggetti *caucasici*. Questo può essere il risultato di una strategia diversa implementata tra etnie diverse. Possibili spiegazioni possono includere un maggior contributo muscolare dei muscoli intrinseci piccoli del piede in soggetti caucasici, poiché è emerso che le dita sono più attivamente coinvolte nella falcata, ma questo avrebbe bisogno di essere ulteriormente analizzato da analisi EMG o sulla forza.

Capitolo 3

VALUTAZIONE MORFOMETRICA DELLE COMPONENTI SCHELETRICHE

3.1 Tecniche di analisi per la valutazione della morfometria ossea del piede

Lo studio della morfometria dell'osso è importante in anatomia, in biomeccanica e nella progettazione di giunzioni in artoplastica, infatti, il design delle protesi è strettamente correlato alla conoscenza della geometria delle giunture, sia per la corretta replicazione artificiale della loro funzionalità sia per un'adeguata valutazione della misura dei vari componenti dell'impianto protesico. In particolare scarseggiano le informazioni riguardanti le articolazioni delle ossa della caviglia. Per affrontare sempre con maggior precisione questo problema, sono state avanzate idee e tecniche differenti, tra queste è di interesse uno studio che si serve di un nuovo metodo di misura, che utilizza una tecnica radiografica semi-automatica, basata sulle proiezioni standard laterale e antero-posteriore tipiche dei raggi x.

I successi clinici di tutti i tipi di giunture artoplastiche dipendono anche dalle informazioni a disposizione sulla morfometria delle ossa più importanti. Ad esempio, i risultati clinici meno soddisfacenti per quanto riguarda la caviglia sono stati in primo luogo associati ad un' inadeguata progettazione delle protesi. Il design delle protesi deve tener conto della naturale mobilità e stabilità, e soprattutto della conoscenza della geometria delle articolazioni e della misura delle ossa stesse. Infatti la conoscenza delle corrette dimensioni rappresenta un passo fondamentale al fine di una buona progettazione. Finora gli studi pubblicati su questo tema non sono stati molti, e in ogni caso non è mai stata specificata

l'affidabilità delle misure riportate, nonostante la precisione e l'accuratezza del metodo rappresentino un elemento fondamentale nell'analisi morfologica.

3.1.1 Metodo semi automatizzato basato sulle immagini ottenute ai raggi X

Il metodo discusso in queste pagine origina da uno studio svolto su un campione di popolazione abbastanza contenuto e omogeneo, con tecniche poco invasive, dal quale risultano dati affidabili con il fine di ottenere un'analisi statistica. Nonostante la tecnica radiografica sia già da tempo in uso per la valutazione di caratteristiche morfometriche, l'affidabilità fino ad ora ottenuta risulta dipendere troppo dalle abilità dell'operatore. Inoltre è stata dimostrata l'importanza, in termini di precisione e ripetibilità, della misura tramite l'utilizzo di tecniche automatiche. In conseguenza a ciò e allo scopo di migliorare l'affidabilità delle misure e la qualità delle conoscenze in questo ambito è stato di recente proposto e accettato questo nuovo metodo, che utilizza i raggi x per la misurazione di un ampio spettro di variabili all'articolazione della caviglia umana. Le misure sono state prese da un articolo "A new semi-automated measurement technique based on X-ray picture for ankle morphometry", Rita Stagni et al., Journal of Biomechanics, Novembre 2003, basato su un gruppo di 15 soggetti maschi, reclutati in reparto con una prescrizione per l'esposizione a raggi x standard sui piani laterale e antero-posteriore, e successivamente è stata attestata l'integrità di ossa e giunti. La media (e la deviazione standard) per i seguenti parametri sono :

Età (anni)	Altezza (cm)	Peso (kg)	Numero
37,0 (16,5)	175 (9)	74,1 (11,0)	15 uomini

Tabella 3.1 Caratterizzazione del campione.

Le proiezioni dei raggi x sul piano laterale e antero-posteriore sono ottenute in condizione di scarico con la caviglia in posizione naturale, per analizzare, rispettivamente, la geometria nel piano sagittale e frontale. Vengono così esposti approssimativamente metà della parte distale della tibia, della fibula e del retro del piede. Una sfera di metallo (20

mm diametro, 0,01 mm tolleranza) è usata per calcolare la magnificazione della lastra nel livello del piano di analisi. Solitamente tale sfera è appoggiata di fronte alla caviglia nella proiezione laterale e oltre il malleolo laterale nella proiezione antero-posteriore. Le immagini ai raggi x così ottenute vengono scannerizzate con una risoluzione di 500 pixel/in. Viene poi svolta l'analisi morfometrica per ciascuna coppia di immagini usando un software apposito sviluppato in matlab. Le misure prese sono quelle descritte sotto e rappresentate in Figura 3.1 e 3.2. All'operatore è richiesto di misurare per prima cosa la geometria del piano sagittale e poi di quello frontale. I contorni delle ossa vengono trovati automaticamente utilizzando un filtro di Canny.

Le prime due cose da fare in ogni immagine sono le seguenti :

- (i) Definizione dei riferimenti anatomici. I primi ad essere selezionati nelle due immagini sono i due profili dell'albero tibiale. Questi profili sono delineati con linee tramite il metodo dei minimi quadrati e l'asse longitudinale della tibia è definito come asse principale.
- (ii) Quantificazione del fattore di magnificazione. L'intero contorno della sfera è selezionato automaticamente e adattato con il metodo dei minimi quadrati con le equazioni di una circonferenza. Il fattore di magnificazione è calcolato come il rapporto tra la il raggio misurato e quello vero.

È stata poi accertata l'esistenza di una buona accuratezza (1 mm) e che la ripetibilità non dipenda dall'abilità dell'operatore.

3.2 Morfometria delle ossa della caviglia

Il complesso articolare della caviglia è composto da due articolazioni, la talocrurale, costituita dalla tibia, dalla fibula e dall'astragalo, e la subtalare, composta da astragalo e calcagno.

3.2.1 Morfometria della tibia e della fibula

Il metodo semi automatizzato descritto nel paragrafo precedente permette di

valutare la morfometria della tibia e della fibula.

Piano sagittale:

Il profilo della morsa tibiale è il primo elemento selezionato per il calcolo automatico di:

- **Lunghezza dell'arco tibiale ($TiAL$)**: lunghezza del segmento che connette la parte più posteriore (B) e più anteriore(A) della morsa tibiale.
- **Raggio sagittale della morsa tibiale ($SRTi$)**: raggio della circonferenza calcolato tramite il metodo dei minimi quadrati per approssimare i punti del profilo della morsa tibiale.
- **Buco antero-posteriore (APG)**: distanza lungo l'asse longitudinale della tibia tra A e B
- **Angolo di inclinazione antero-posteriore della morsa tibiale (APA)**: angolo tra il segmento AB e l'asse antero-posteriore della tibia.

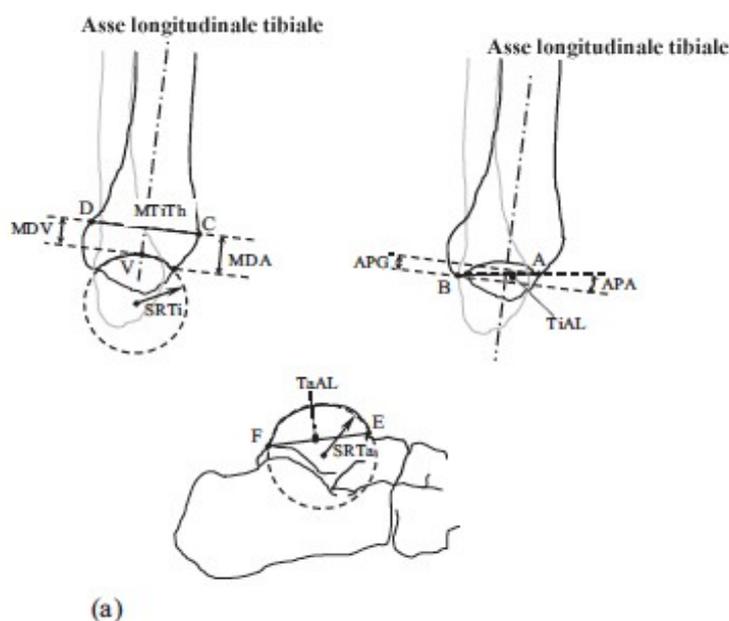


Figura 3.1. Profilo sagittale (a) dei segmenti tibio-fibulare e talare. Sono illustrate schematicamente le misure morfometriche.

Il profilo anteriore della parte distale della tibia è quindi selezionato per il calcolo automatico di :

- **Massimo restringimento della tibia ($MtiTh$)**: distanza tra il punto più anteriore del profilo anteriore della tibia (C) e il corrispondente punto (D) lungo l'asse antero-posteriore della tibia nel profilo antero-posteriore della stessa.
- **Distanza tra il livello dell' $MtiTh$ dal limite anteriore della morsa (MDA)**: distanza lungo l'asse longitudinale della tibia tra A e B.
- **Distanza tra il livello di $MtiTh$ dal vertice della morsa (MDV)**: distanza lungo l'asse longitudinale della tibia tra il vertice della morsa della tibia V , definita come l'intersezione tra l'asse longitudinale della tibia e il profilo della morsa tibiale, e C.

Il profilo della cupola del talo è in fine selezionato per il calcolo automatico di :

- **Lunghezza della troclea del talo ($TaAL$)**: lunghezza del segmento che connette il punto più posteriore (F) e più anteriore (E) dell'arco sagittale della troclea del talo.
- **Raggio saggiale della troclea dell'arco ($SRTa$)**: raggio della circonferenza calcolato con il metodo dei minimi quadrati sui punti del profilo dell'arco della troclea del talo.

Proiezione frontale

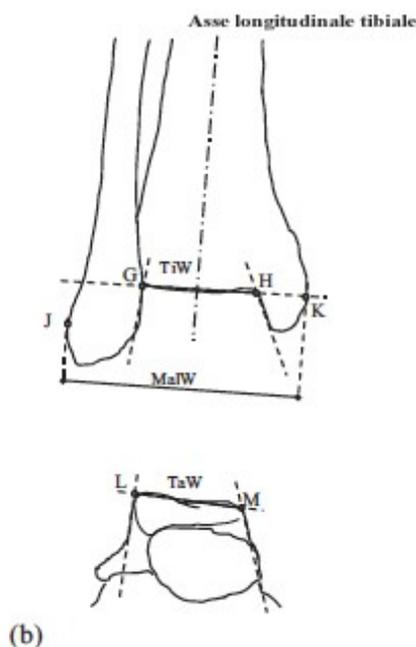


Figura 3.2. Profilo frontale (b) dei segmenti tibio-fibulare e talare. Sono illustrate schematicamente le misure morfometriche.

I profili delle tre facce della parte distale dell'articolazione superficiale tibio-fibulare sono sezionate per il calcolo di:

- **Larghezza della tibia (TiW)**: distanza delle due intersezioni (G e H), delle due linee sul profilo interno dei due malleoli, con la linea passante per il piatto tibiale.

I profili del malleolo laterale e mediale sono selezionati per il calcolo di :

- **Larghezza del malleolo (MalW)**: distanza lungo l'asse medio laterale tra il punto più mediale del profilo mediale (K) della tibia e il punto più laterale del profilo laterale (J) della fibula.
- **Larghezza del talo (TaW)**: distanza tra le due intersezioni (L e M) delle due linee calcolate tramite il metodo dei minimi quadrati sui profili mediale e laterale dell'articolazione del talo e la linea sulla sommità del profilo articolare del talo.

Sono in fine stati calcolati il valore medio, la deviazione standard, il massimo, il minimo e la mediana sull'intero gruppo di pazienti. Le immagini ai raggi X sono state prese da un gruppo di 15 soggetti maschi, con media (e deviazione standard) per l'età di 37,0 (16,5), peso 74,1 (11,0) kg e altezza 175 (9) cm.

Un operatore esperto esegue dieci misure, e dieci operatori meno esperti ne eseguono una a testa, questi sono rispettivamente i metodi usati per le misure intra ed inter operator.

	Intra-operator test (n = 10)				Inter-operator test (n = 10)		
	Mean	S.D.	Max-Min	Median	Mean	S.D.	Max-Min
TiAL	28.5	0.3	1.0	28.5	28.5	0.3	0.9
SRTi	26.1	1.2	3.3	25.8	26.5	1.1	3.3
APG	5.5	0.4	1.3	5.5	5.3	0.4	1.1
APA	11.0	0.9	2.7	11.2	10.7	0.9	2.4
TiW	29.1	0.5	1.1	29.1	28.9	1.0	2.5
MalW	66.1	0.2	0.7	66.2	66.0	0.2	0.7
TaAL	40.5	1.0	3.0	40.8	40.6	1.0	3.0
SRTa	21.2	0.4	1.2	21.3	21.3	0.5	1.3
TaW	28.3	0.3	1.0	28.3	28.3	0.4	1.0
MTiTh	41.7	0.5	1.9	41.6	41.6	0.5	1.8
MDV	10.2	0.7	1.8	10.5	10.3	0.6	1.8
MDA	11.5	0.8	2.1	11.9	11.6	0.7	1.8

Tabella 3.2 Media, deviazione standard, differenza massimo-minimo e valore mediano delle 12 misure morfometriche della caviglia, per l'intra e inter operator test, rispettivamente nei singoli soggetti.

Le distanze punto a punto riportate mostrano un errore di picco minore di 1 mm. La risoluzione nella valutazione del raggio dell'arco dipende dall'ampiezza dell'angolo sotteso all'arco stesso. L'errore di picco del raggio è minore di 1 mm per angoli più ampi di 40°. Queste valutazioni considerano anche l'eventuale posizione errata della sfera per la quantificazione della magnificazione, la cui influenza sull'errore è minore di 0,5 mm. È osservata una buona ripetibilità (precisione) nelle misure. Nel test intra-operator TiAL, MalW e TaW danno una differenza massimo-minimo inferiore ad 1 mm (0,9 / 0,7 / 0,4 rispettivamente) e APG, TiW, SRTa, MTiTh, MDV meno di 2 mm (1,4 / 1,1 / 1,3 / 1,9 / 1,8 mm, rispettivamente). SRTi, TaAL, MDA, APA, danno la più alta differenza massimo-minimo (3,3 / 3 / 2,1 mm e 2,7° rispettivamente). La variabilità delle misure nel inter-operatr test è confrontabile con quella dell'intra-operator. La differenza maggiore, di 3mm, è stata riscontrata nella misura del SRTa.

	Mean	S.D.	Max	Min	Median
TiAL	33.3	3.5	40.9	28.8	32.8
SRTi	30.8	8.0	57.1	23.1	28.4
APG	3.2	2.1	8.0	0.1	3.4
APA	5.6	3.4	11.2	0.2	6.0
TiW	32.8	5.5	40.4	13.2	33.6
MalW	71.2	8.3	82.1	54.0	74.0
TaAL	43.4	3.9	49.6	35.1	44.3
SRTa	24.3	4.2	32.5	14.4	24.6
TaW	31.6	2.6	36.6	25.6	31.9
MTiTh	44.4	4.3	50.9	33.7	45.0
MDV	8.8	2.7	14.3	3.0	8.3
MDA	11.4	3.0	16.8	4.4	11.1

Tabella 3.3. Misure morfometriche ottenute

Non si nota correlazione significativa con peso e altezza.

Tale metodo ha lo scopo di supportare il design di protesi all'anca. Un test sull'accuratezza ha dimostrato che il metodo risulta sufficientemente accurato per ciò che si prefigge, proponendo una differenza da ciò che ci si aspetta di circa 1,5 mm per tutte le misure tranne SRTa. Considerando che l'angolo sotteso all'arco del talo è di circa 140° questo errore abbastanza grande può essere attribuito allo strato di cartilagine sulla superficie del talo non osservabile ai raggi x, e alla modellazione, tramite un

unico arco, della superficie a cupola del talo, senza tener conto della forma conica e a sella della parte medio-laterale di quest'osso. I due tipi di test dimostrano che il metodo dipende dalle abilità dell'operatore solo in modo marginale. Il confronto con i dati riportati in letteratura risulta soddisfacente, dimostrando l'affidabilità di questo metodo. Ed quindi utilizzabile per il design degli impianti protesici ed essendo semi-automatico permette il minimo impiego di persone fisiche.

3.2.2 Morfometria dell'astragalo

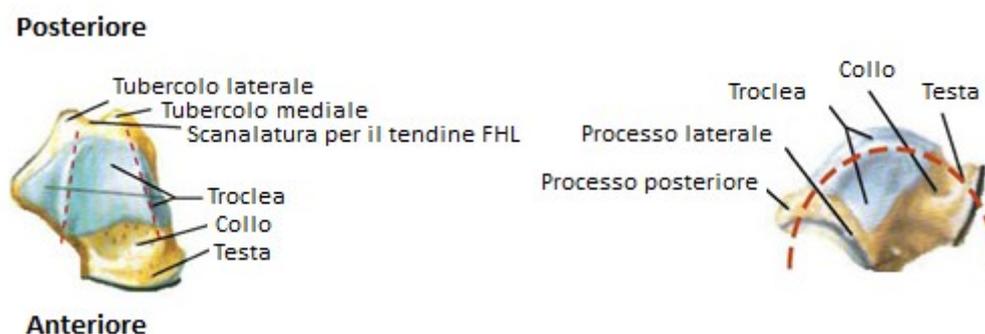


Figura 3.3.e 3.4. Visione superiore dell'astragalo.Vista laterale dell'astragalo.

L'**Astragalo** è l'osso localizzato tra i due malleoli, laterale e mediale, e il tarso. Esso è ancorato attraverso legamenti forti ma non ha nessuna attaccatura tendinea. Nell'astragalo si distinguono una testa e un corpo separati dal collo. La testa presenta una faccia articolare per lo scafoide, mentre il corpo nella parte superiore è caratterizzato dalla troclea, che si articola con la tibia, e nella parte inferiore da tre facce articolari calcaneari: anteriore, media e posteriore (TSRM M. Battista). La lunghezza media dell'astragalo è di 48 mm e va da un minimo di 40 mm ad un massimo di 60 mm. La larghezza invece mediamente è di 37 mm, con un range di misura che va da 30 mm a 45 mm. Questi dati sono stati ricavati attraverso lo studio di 100 tali secchi (Sarrafian, 1993). Usando un approccio analitico si ricavano misure di lunghezza e larghezza di 53.74 ± 3.95 mm e 35.86 ± 3.3 mm, rispettivamente (Ringleb et al, 2003). Questi studi misurano la morfologia attraverso tecniche di immagini di risonanze ma-

gnetiche attraverso le quali si ricavano dei modelli 3D (Udupa, J.K., et al., 1994). La troclea è stata comparata ad un tronco di cono il cui angolo alla sommità è mediamente di $24^\circ \pm 11^\circ$; l'asse di rotazione si orienta secondo due angoli diversi: nel piano coronale, passa sotto e lateralmente all'apice dei due malleoli formando un angolo di $82^\circ \pm 3.6^\circ$ con l'asse della tibia, e nel piano trasversale, dietro e lateralmente ad un angolo di 20° - 30° con l'asse trasversale del ginocchio.

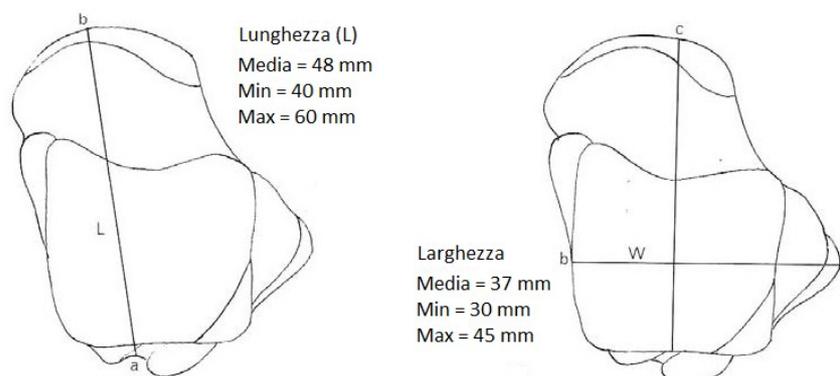


Figura 3.5. Assi di misura della lunghezza (L) e della larghezza (W) dell'astragalo.

Nel piano sagittale il collo dell'astragalo è deviato rispetto al corpo dell'astragalo stesso, formando un angolo di inclinazione che varia da soggetto a soggetto (Jason Robert Toy 2009). Nel profilo laterale, invece, è formato da un arco di cerchio e l'asse di rotazione passa sempre attraverso il centro di questo cerchio, in qualsiasi posizione si trovi l'osso (Barnett e Napier, 1952). Il raggio di curvatura della troclea è più piccolo sul lato mediale rispetto al laterale (Stiehl e Inman, 1991). Alcuni studi hanno determinato il raggio della cupola astragalica: attraverso l'utilizzo di radiografie di 23 caviglie normali e sei caviglie deformate si è trovato essere di $21,79 \pm 3.22$ mm e di $23,17 \pm 3.76$ mm rispettivamente nelle caviglie normali e deformi (Junitha et al, 2008).

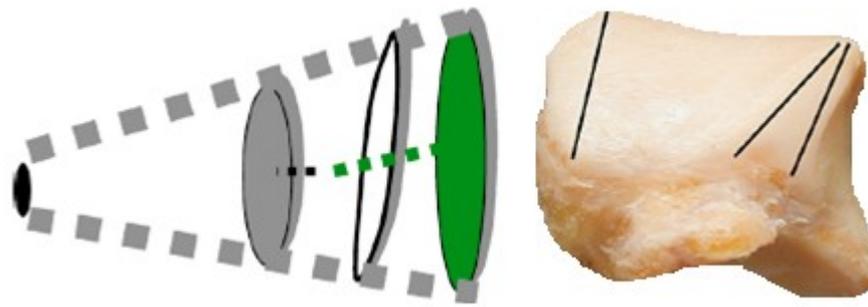


Figura 3.6 Morfologia dell'astragalo: tronco di cono asimmetrico.

In uno studio simile con 21 cavie normali, il raggio della cupola astragalica è stato di $20,7 \pm 2,6$ mm (Hayes et al., 2006).



Figura 3.7. Talar dome radius.

Infine, la parte inferiore dell'astragalo si connette con la faccia superiore del calcagno. La faccetta articolare inferiore e posteriore, speculare alla faccetta posteriore del calcagno, è di forma cilindrica e orientata verso il bordo anteriore della superficie trocleare.

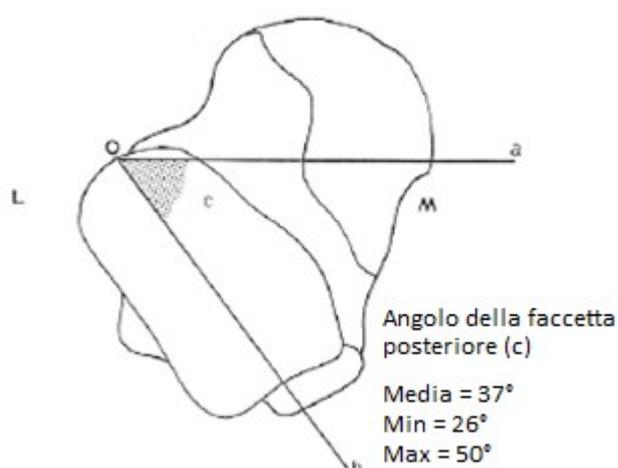


Figura 3.8. Astragalo: orientazione faccetta articolare inferiore e posteriore.

L'astragalo è un osso particolare, innanzitutto, come detto in precedenza, non comporta alcuna inserzione muscolare: tutti i muscoli che vengono dalla gamba passano a ponte attorno ad esso, perciò è stato soprannominato osso “ingabbiato”, ed è ricoperto interamente da superfici articolari e da inserzioni legamentose per cui è soprannominato anche osso “rilegato”.

3.2.3 Morfometria del calcagno

Il **Calcagno** è il più grande osso del tarso. Posteriormente esso presenta una grande tuberosità, nella quale si inserisce il tendine di Achille, anteriormente, invece, presenta la faccia articolare per il cuboide e superiormente le tre faccette articolari astragaliche (anteriore, media e posteriore). Sulla superficie mediale vi è il sostentacolo dell'astragalo, che è un processo osseo che sporge medialmente, al disopra del quale si trova la faccia articolare astragalica media (TSRM M. Battista).

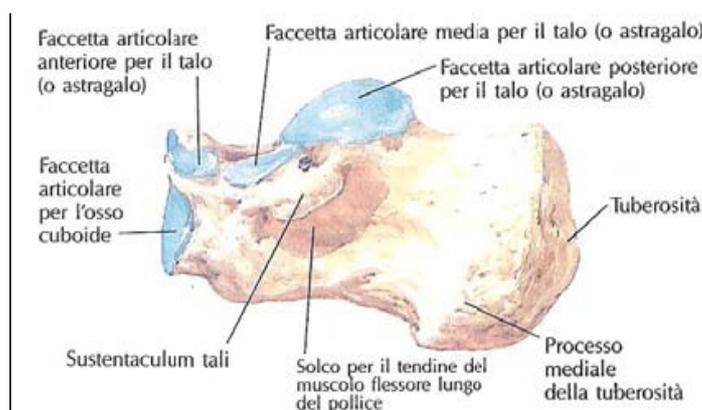


Figura 3.9. Calcagno; vista laterale.

Le dimensioni del calcagno sono variabili; la lunghezza media è di 75 mm ed il range va da un minimo di 48 mm ad un massimo di 98 mm.

La larghezza media è di 40 mm con un minimo di 26 mm ed un massimo di 53 mm, infine, l'altezza media è approssimativamente il 50% della lunghezza, e quindi 40 mm con un range da 33 mm a 47 mm (Sarrafian, 1993).

La lunghezza del primo asse geometrico principale (L) è stata misurata anche attraverso una ricostruzione 3D di immagini ottenute attraverso la risonanza magnetica di 18 soggetti e il risultato è simile ai precedenti, ovvero 78.48 ± 7.14 mm. Gli altri due assi principali, relativi alla larghezza (W) e all'altezza (H) sono risultati rispettivamente di 39.89 ± 4.44 mm e 37.54 ± 4.74 mm (Ringleb et al, 2003).

L'asse L risulta, inoltre, essere inclinato positivamente rispetto al piano orizzontale da un minimo di 10° fino ad un massimo di 30° .



Figura 3.10. Orientazione assi L, W, H, e inclinazione dell'asse principale del calcagno.

Il calcagno ha molte funzioni a livello morfologico che variano da individuo a individuo come ad esempio: la configurazione delle faccette articolari anteriore, mediale e posteriore, l'inclinazione della superficie articolare posteriore e l'inclinazione e la misura del sustentacolo dell'astragalo.

Le tre faccette articolari possono presentarsi in tre modi: tutte e tre distinte e separate, l'anteriore e la mediale confluenti, o tutte e tre le faccette unite in un'unica superficie.

In aggiunta a queste tre superfici articolari principali, nel 7% dei casi, si possono trovare altre tre estensioni che corrispondono alla faccetta mediale, e che possono formare un'unione e una cancellazione del "canalis tarsi". La faccetta posteriore provoca un aspro cambiamento nell'orientazione relativa del segmento posteriore che si abbassa anteriormente creando uno scalino con il processo anteriore (Sarrafian, 1993). Altra sezione importante del calcagno è il cosiddetto sustentacolo dell'astragalo (*sustentaculum tali*), il quale è una specie di staffa triangolare da una base posteriore e un apice anteriore. Questa superficie si proietta anteromedialmente e si inclina anteriormente verso il basso di un angolo di 46° in media (min 30° e max 60°) (Sarrafian, 1993).

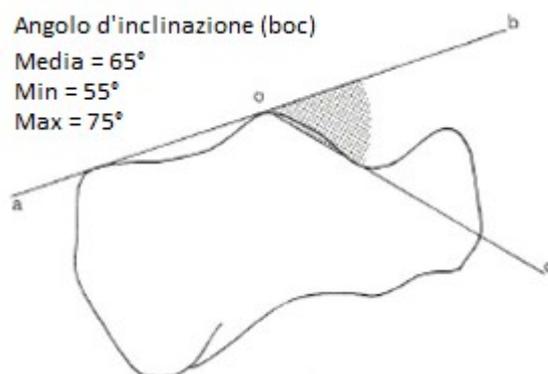


Fig. 3.11. Superficie articolare posteriore del calcagno (angolo di inclinazione).

Le misure del sustentacolo variano; la larghezza misurata alla base è mediamente di 13 mm con un minimo di 8 mm e un massimo di 18 mm. Il rapporto tra la larghezza sustentacolare e la larghezza totale del calcagno è 0.33, con un minimo di 0.23 e un massimo di 0.47. Questi valori possono essere correlati con le funzioni sostenitive del sustentacolo relative alla testa dell'astragalo. Il sustentacolo può anche essere classificato, in base alla sua lunghezza, come lungo o corto.

Un “*sustentaculum tali*” lungo è continuo, lungo tutto il suo bordo mediale, con il processo anteriore, tanto da essere associato alla fusione delle faccette articolari anteriore e mediale.

Un “*sustentaculum tali*” corto, invece, finisce improvvisamente anteriormente, tanto da essere associato all'interruzione tra le due faccette articolari (Jason Robert Toy, 2009).

3.3 Valutazioni dei parametri morfometrici relativi alla struttura ossea del piede

La tecnica radiologica offre un metodo conveniente per quantificare e studiare la struttura delle ossa in una situazione di carico. La conoscenza di tali misure è d'aiuto in ambito pre-operatorio e per la pianificazione delle operazioni stesse. Inoltre sono d'interesse anche in relazione alle varie patologie, in quanto se non appartenenti a certi range prestabiliti, potrebbero essere dei predittori di insorgenza di queste, o quanto meno, indicare la predisposizione a fratture e incidenti. Tali parametri costituiscono inoltre misure d'interesse per la valutazione di picchi di pressione nelle varie zone della pianta del piede.

Nonostante ciò solo il 35% della variabilità della distribuzione pressoria può essere giustificato tramite misure radiografiche. Altri predittori sono attribuibili ai tessuti molli e a misure relative agli archi plantari, ritenuti i parametri più significativi per stimare la pressione nel calcagno e sulla testa del primo metatarso. Inoltre l'analisi della distribuzione pressoria risulta utile nel determinare l'interazione tra piede e suolo e piede e scarpa.

Sono di interesse per valutare la struttura interna del piede e la distribuzione pressoria 14 misure laterali e 12 dorso-plantari sia angolari che lineari.

Le misure di interesse delle ossa del piede sono schematizzate come segue:

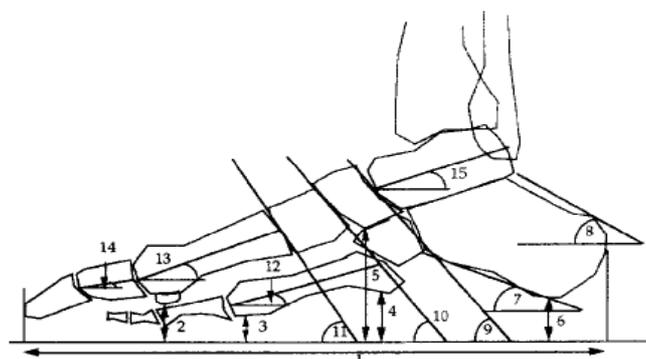
Lista delle misure radiografiche dalla vista laterale:

- 1. Lenght** : Lunghezza del piede, rappresenta la lunghezza totale del piede.
- 2. Ses ht** : Altezza dell'osso sesamoide, è la distanza tra il suolo e la superficie più bassa del primo MT sesamoide.
- 3. MTH 5ht** : Altezza della testa del quinto MT, distanza tra il suolo e la parte più bassa del quinto MT.
- 4. 5 base ht** : altezza della base del quinto MT, distanza tra il suolo e la superficie più bassa della base del quinto MT5.

5. Navic ht : altezza del navicolare, distanza tra il suolo e la superficie più bassa della tuberosità navicolare.

6. Calc ht : altezza calcaneale, distanza tra il suolo e la parte più bassa del calcagno.

7. Inf Clac : inclinazione del calcagno inferiore, angolo tra l'orizzontale e la parte inferiore del calcagno.



- | | | |
|--------------|-------------|--------------|
| 1. length | 6. Calc ht | 11. Lisfranc |
| 2. Ses ht | 7. Inf Calc | 12. M5 |
| 3. MTH5 ht | 8. Sup Calc | 13. M1 |
| 4. 5 base ht | 9. Chop | 14. P1 |
| 5. Navic ht | 10. Nav-Cun | 15. Talus |

* All angles are measured between the axis that bisects the bone and the horizon

Figura 3.12. Diagramma schematico delle misure radiografiche della vista laterale

8. Sup Calc : inclinazione del calcagno superiore, angolo tra l'orizzontale e la superficie superiore del calcagno.

9. Chop : angolo nella giunzione di Chopart, angolo tra l'orizzontale e la superficie prossimale del navicolare.

10. Nav-Cun : angolo tra navicolare e primo cuneiforme, angolo tra l'orizzontale e la superficie prossimale del primo cuneiforme.

11. Lisfranc : angolo di Lisfranc, angolo tra l'orizzontale e la superficie prossimale di MT 1.

12. M5 : inclinazione di MT 5, angolo tra l'orizzontale e la linea mediana della diafisi del MT 5.

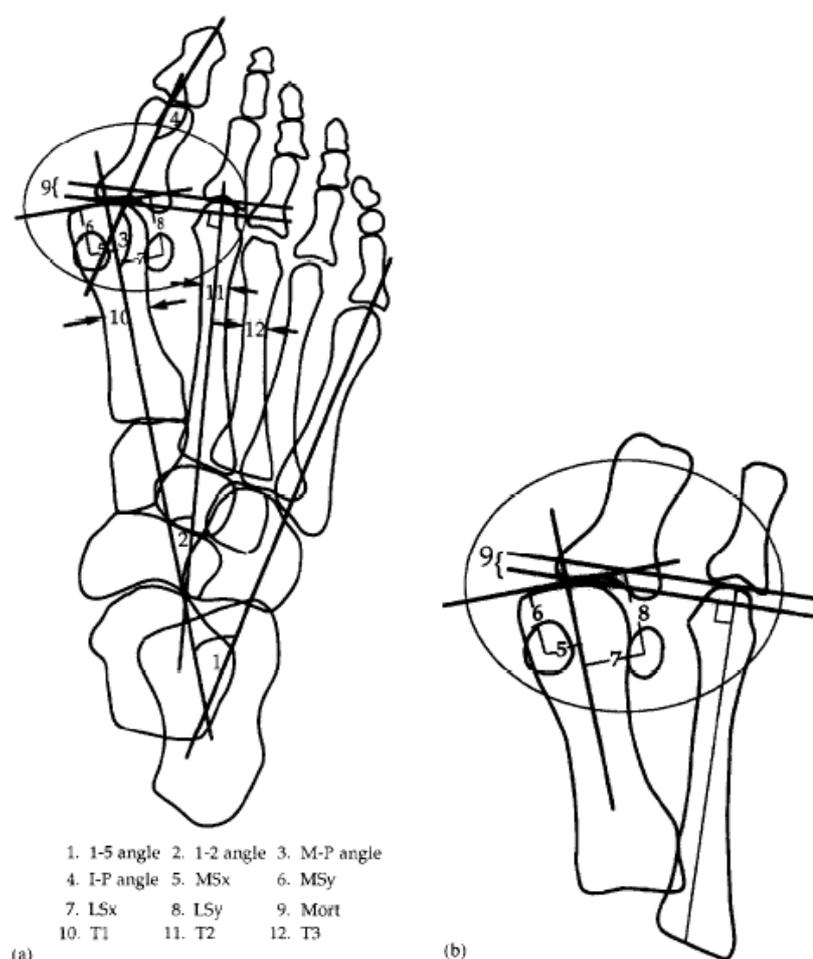


Figura 3.13.(a) Diagramma schematico delle misure radiografiche della visione A-P. (b) Vista estesa sulla regione della testa metatarsale.

13. M1 : inclinazione di MT 1, angolo tra l'orizzontale e la linea mediana della staffa del 1 MT.

14. P1 : inclinazione della prima falange prossimale, angolo tra l'orizzontale e la staffa prossimale della prima falange.

15. Talus : inclinazione del talo, angolo tra l'orizzontale e la diafisi del talo.

Lista delle misure radiografiche dalla vista antero-posteriore:

1. 1-5 angle : angolo intermetatarsico 1-5, angolo tra la diafisi del primo e del quinto MT.

2. 1-2 angle : angolo intermetatarsale 1-2, angolo tra la diafisi del primo e del secondo MT.

- 3. M-P angle** : angolo tra il primo MT e la rispettiva falange, angolo tra la diafisi del primo MT e la staffa della prima falange prossimale.
- 4. 1-P angle** : angolo interfalangeale, angolo tra la parte prossimale e distale della diafisi della prima falange.
- 5. Msx** : deviazione x del sesamoide mediale, deviazione del sesamoide mediale dall'origine, nella direzione mediale-laterale.
- 6. Msy** : deviazione y del sesamoide mediale, deviazione del sesamoide mediale dall'origine, nella direzione antero-posteriore.
- 7. Lsx** : deviazione laterale del sesamoide, deviazione del sesamoide laterale dall'origine in direzione mediale-laterale.
- 8. Lsy** : deviazione y del sesamoide laterale, deviazione del sesamoide laterale dall'origine in direzione antero-posteriore.
- 9. Mort** : indice di Morton, protrusione distale di MTH1 relativamente a MTH2.
- 10. T1** : minimo restringimento della diafisi del primo metatarso.
- 11. T2** : minimo restringimento della diafisi del secondo metatarso.
- 12. T3** : minimo restringimento della diafisi del terzo metatarso.

Le misure a disposizione provengono da uno studio su un campione così distribuito : 50 soggetti privi di sintomi, di età (media e s.d.) $63,3 \pm 13,1$ anni, altezza $169,4 \pm 8,1$ cm, peso $70,0 \pm 10,5$ kg.

Valutazione morfometrica delle componenti scheletriche

List of radiographic measurements and their statistics

Code	Term	Units	Mean	S.D.	*ICC1	*ICC2
Length	Foot length	mm	249.7	13.6	0.98	0.98
Ses ht	Sesamoid height	mm	7.6	2.8	0.96	0.87
MTH 5 ht	Fifth MT head height	mm	5.1	1.7	0.92	0.84
5 base ht	Fifth MT base height	mm	12.4	3.4	0.97	0.87
Navic ht	Navicular height	mm	40.2	8.2	0.99	0.98
Calc ht	Calcaneal height	mm	9.8	2.4	0.98	0.96
Inf Calc	Inferior calcaneal inclination	deg	22.5	6.1	0.98	0.97
Sup Calc	Superior calcaneal inclination	deg	21.3	6.1	0.95	0.95
Chop	Chopart's joint angle	deg	62.0	4.9	0.90	0.90
Nav-Cun	Navicular 1st-cuneiform angle	deg	62.3	4.8	0.85	0.70
Lisfranc	Lisfranc's angle	deg	63.2	4.3	0.75	0.71
M5	MT 5 inclination	deg	11.0	3.0	0.87	0.64
M1	MT 1 inclination	deg	21.3	4.6	0.83	0.75
P1	Proximal 1st phalanx inclination	deg	7.3	7.7	0.88	0.87
Talus	Talar inclination	deg	28.8	4.5	0.54	0.51
1-5 angle	Intermetatarsal 1-5 angle	deg	22.9	4.3	0.94	0.92
1-2 angle	Intermetatarsal 1-2 angle	deg	7.8	2.7	0.46	0.44
M-P angle	MT1-phalangeal 1 angle	deg	14.4	8.8	0.95	0.88
I-P angle	Interphalangeal 1 angle	deg	10.4	4.4	0.84	0.70
MSx	Medial sesamoid x deviation	mm	2.4	3.9	0.95	0.95
MSy	Medial sesamoid y deviation	mm	11.8	2.9	0.89	0.86
LSx	Lateral sesamoid x deviation	mm	7.6	4.3	0.98	0.98
LSy	Lateral sesamoid y deviation	mm	14.4	2.7	0.83	0.80
Mort	Morton's Index	mm	1.3	3.2	0.99	0.98
T1	Metatarsal 1 thickness	mm	13.6	1.8	0.98	0.98
T2	Metatarsal 2 thickness	mm	6.9	0.8	0.93	0.90
T3	Metatarsal 3 thickness	mm	6.1	1.0	0.86	0.84

Tabella 3.4. Misure morfometriche

*ICC1 = ripetizione di misure ICC *ICC2 = ICC radiografiche

3.4 Valutazione delle posizioni relative tra coppie di segmenti ossei del piede

Dopo aver discusso la morfometria interna del piede, è interessante notare come lo studio della struttura globale necessiti non solo di misure bidimensionali ma anche di un'analisi più complessa che si sviluppi in tre dimensioni e che consenta di valutare le reciproche posizioni tra i segmenti ossei. È infatti grazie al posizionamento delle ossa le une rispetto alle altre (nonché ai loro reciproci spostamenti) che il piede riesce a svolgere la sua complessa attività.

Assumendo la densità costante dell'osso si riesce a calcolarne il centro del volume e, di conseguenza, ad associare a ciascun elemento un sistema di riferimento cartesiano. Gli assi principali servono per determinare un sistema di coordinate locali, con lo scopo di rappresentare le relazioni che insistono tra i segmenti ossei. Ciò è possibile utilizzando gli angoli di Cardano z, y', x'' , utili per passare spazialmente dalla terna di riferimento (relativa al primo elemento della coppia) a quelle di cui si vuole valutare la posizione (in relazione all'elemento di riferimento). Inoltre le ossa cuneiformi sono trattate come un'unità.

Le 8 coppie di ossa le cui relazioni reciproche sembrano essere più significative sono:

1. **M1Tal** : 1° metatarso-talo;
2. **M5Tal** : 5° metatarso-talo;
3. **CalTal** : calcagno-talo;
4. **CalFib** : calcagno-fibula;
5. **M1M2** : 1° metatarso-2°metatarso;
6. **CunTal** : cuneiforme-talo;
7. **CunNav** : cuneiforme-navicolare;
8. **NavTal** : navicolare-talo;

Gli angoli appartenenti ad analisi svolte sul piede sinistro che descrivono inversione ed eversione, o adduzione e abduzione sono moltiplicati per -1, così che tutti i piedi si possano considerare destri. Non vi sono problemi se la rotazione è considerata nel piano sagittale, si presentano invece se parliamo di piano trasversale e frontale, nel quale eversione e inversione, o rotazione interna ed esterna, hanno segni diversi. Inoltre per semplificare l'analisi e il confronto tra piede destro e sinistro si possono introdurre degli offset di 90° e 180° . Questo è richiesto se la misura sui due piedi è simmetrica (es. sx -70° , dx -110° , aggiungendo 90° si ottiene 20° e -20°). Nel caso di un piede caratterizzato da un allineamento naturale e fisiologico delle ossa, la configurazione che ci aspettiamo di avere è simile a quella mostrata in Figura 3.14. In questa prima figura è rappresentata la relazione che insiste tra il primo metatarso (grigio) e il talo (blu) nei vari piani presi in considerazione, rispettivamente frontale, sagittale e trasversale.

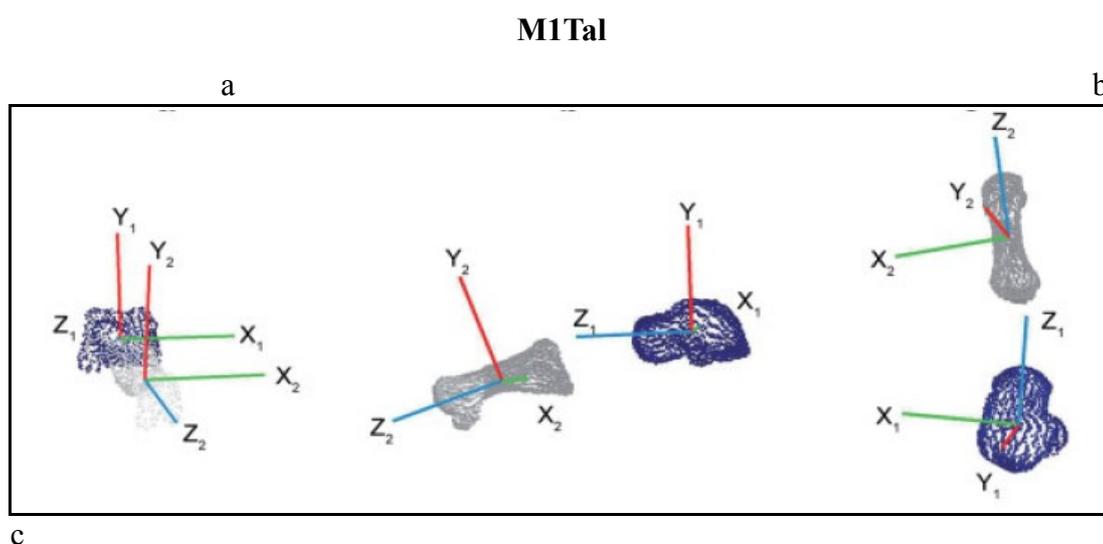


Figura 3.14. Rappresentazione della relazione tra primo metatarso e talo per un piede destro. (a) Rappresenta la vista anteriore del piano frontale, (b) la vista mediale del piano sagittale e (c) una vista dall'alto del piano trasversale.

L'angolo relativo a M1TalY' è soprattutto correlato alle relazioni sul piano trasversale, e in particolare da informazioni sull'adduzione e l'abduzione, mentre l'angolo M1TalX" è per lo più un angolo del piano sagittale che da informazione sulla

dorsiflessione e sulla flessione plantare.

Vengono sotto riportati gli angoli di Cardano relativi alle reciproche posizioni del primo metatarso e del talo.

piede normale	
Primo metatarso (M1) in relazione al talo (Tal)	
M1TalZ	$-4,7 \pm 3,7$
M1TalY'	$-5,5 \pm 3,2$
M1TalX''	$13.1 \pm 2,4$
Angolo Z : +inversione, - eversione; Angolo Y' : + adduzione, - abduzione;	
Angolo X'' : + flessione plantare, - dorsiflessione	

Tabella 3.5. Angoli di Cardano tra primo metatarso e talo.

Le relazioni tra il primo e il secondo metatarso presentano angoli di interesse in tutti e tre i piani. In particolare M2M1Z si riferisce al piano frontale, M1M2Y' è per lo più riferito al piano trasversale, con una piccola componente del piano sagittale e M1M2X'' è approssimativamente riferito al piano sagittale, con una piccola componente del piano trasversale.

È proposto in figura l'allineamento presente tra il primo metatarso e il secondo in condizioni di piede naturalmente allineato, nelle tre visioni frontale, sagittale e trasversale :

M2M1

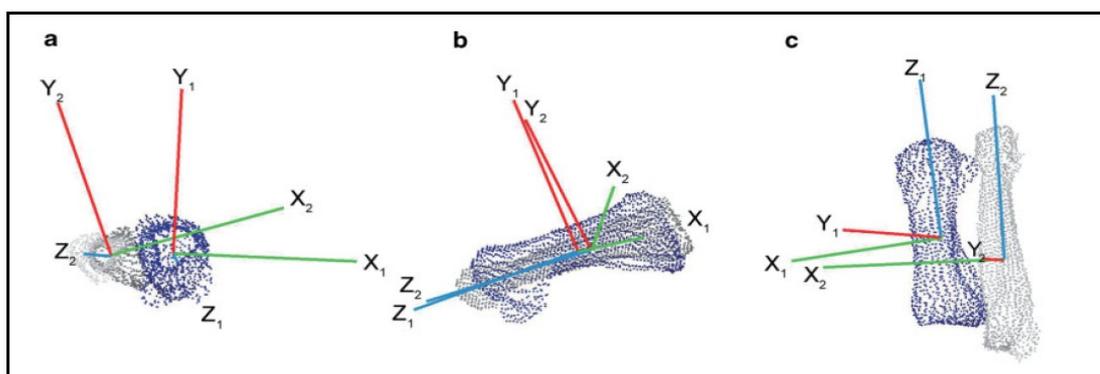


Figura 3.15. Relazione tra primo e secondo metatarso per un piede destro naturalmente allineato. (a) Vista anteriore del piano frontale, (b) vista mediale del piano sagittale e (c) vista dall'alto del piano trasversale.

piede normale	
Secondo metatarso (M2) in relazione al primo metatarso (M1)	
M2M1Z	28,4 ± 2,9
M2M1Y'	-8,6 ± 0,9
M2M1X''	0,1 ± 0,8
Angolo Z : +inversione, - eversione; Angolo Y' : + adduzione/dorsiflessione, - abduzione/flessione plantare	
Angolo X'' : + flessione plantare/adduzione, - dorsiflessione/abduzione	

Tabella 3.6. Angoli di Cardano tra il primo e il secondo metatarso.

Per quanto riguarda le rimanenti coppie, a fornire angoli di interesse, per il piano frontale, sono CunTalZ, CunNavX'' e NavTalZ. Per il piano sagittale un angolo di interesse è CunNavZ. Le cui immagini sono sotto riportate:

CunTal

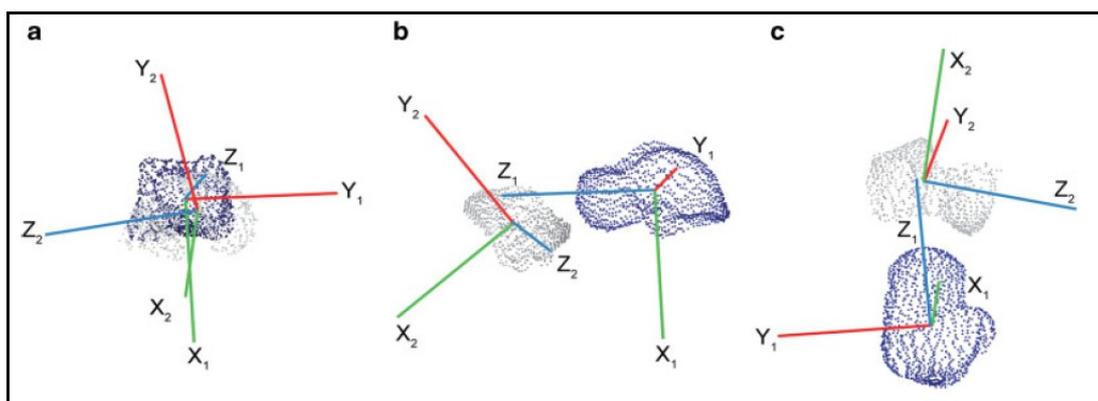


Figura 3.16. Relazione tra cuneiforme e talo per un piede destro allineato naturalmente. (a) Vista anteriore del piano frontale, (b) vista mediale del piano sagittale e (c) vista dall'alto del piano trasversale.

piede normale	
Cuneiforme in relazione al talo	
CunTalZ	-44,1 ± 4,7
CunTalY'	-36,4 ± 2,5
CunTalX''	49,8 ± 4,1
Angolo Z : +inversione, - eversione; Angolo Y' : +flessione plantare/abduzione, - dorsiflessione/adduzione	
Angolo X'' : + dorsiflessione/inversione/adduzione – flessione plantare/eversione/abduzione	

Tabella 3.7. Angoli di Cardano tra cuneiforme e talo.

CunNav

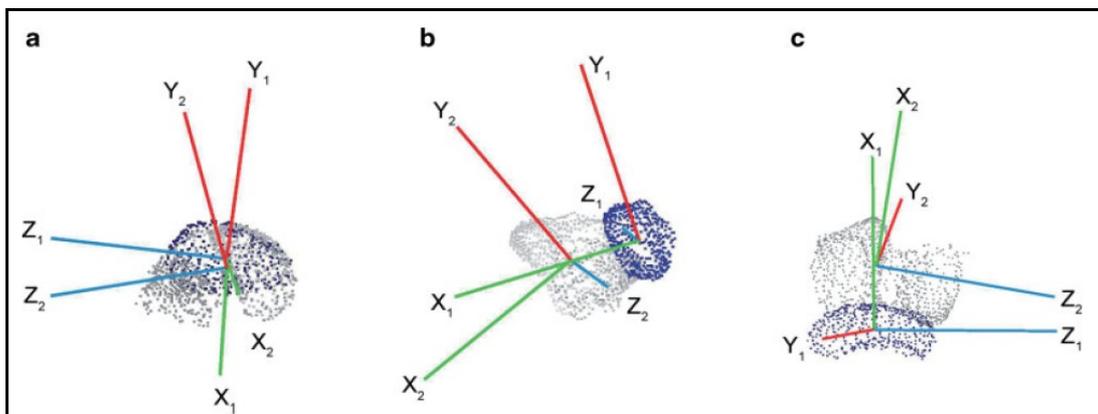


Figura 3.17. Relazione tra cuneiforme e navicolare per un piede destro allineato naturalmente. (a) Vista anteriore del piano frontale, (b) vista mediale del piano sagittale e (c) vista dall'alto del piano trasversale.

piede normale	
Cuneiforme (Cun) in relazione al navicolare (Nav)	
CunNavZ	$-27,6 \pm 2,7$
CunNavY'	$-7,8 \pm 1,0$
CunNavX''	$24,4 \pm 1,9$
Angolo Z : + inversione, - flessione plantare; Angolo Y' : + adduzione, - abduzione	
Angolo X'' : + inversione, - eversione	

Tabella 3.8. Angoli di Cardano tra cuneiforme e navicolare.

NavTal

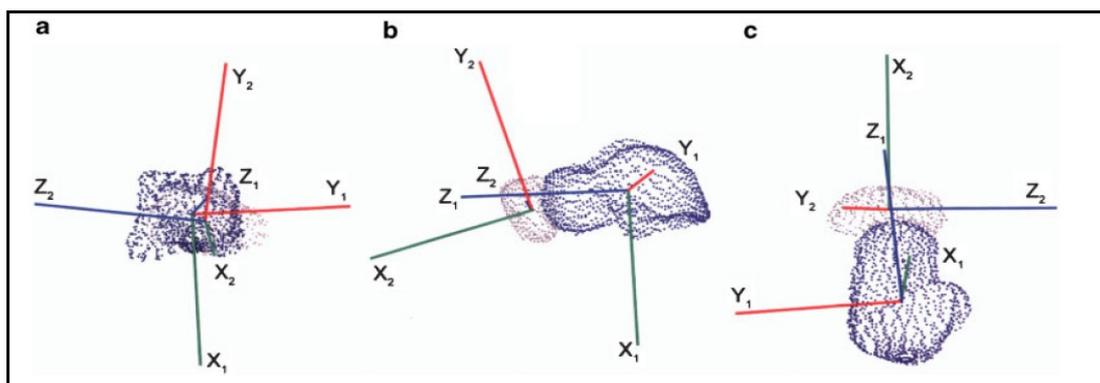


Figura 3.18. Relazione tra navicolare e talo per un piede destro allineato naturalmente. (a) Vista anteriore del piano frontale, (b) vista mediale del piano sagittale e (c) vista dall'alto del piano trasversale.

piede normale	
Navicolare (Nav) in relazione al talo (tal)	
NavTalZ	-52,3 ± 6,5
NavTalY'	-63,0 ± 2,4
NavTalX''	35,9 ± 5,6
Angolo Z : + inversione, - eversione; Angolo Y' : + flessione plantare/abduzione, - dorsiflessione/adduzione	
Angolo X'' : + dorsiflessione/inversione/adduzione – flessione plantare/eversione/abduzione	

Tabella 3.9. Angoli di Cardano tra cuneiforme e navicolare.

3.5 Valutazione delle grandezze antropometriche relative agli archi plantari

Le ossa che compongono il piede si articolano tra di loro per formare, grazie ad un complicato sistema di tiranti muscolari, tendinei e capsulo-legamentosi, una struttura ad arco sospeso con 3 punti di appoggio principali. Una delle più importanti caratteristiche strutturali del piede dell'uomo è l'arco mediale longitudinale, che provvede al necessario assorbimento degli urti a cui è soggetto il piede durante l'attività quotidiana. La struttura dell'arco consente di attenuare i traumi nella fase di appoggio del tallone e di pieno appoggio del piede, e di assumere il ruolo di leva rigida durante la fase di distacco delle dita. L'arco gioca un ruolo principale durante ciascuna di queste funzioni, tramite l'allineamento delle ossa, dei muscoli, dei tendini e dei legamenti, che permettono l'adattamento alla funzione da svolgere. È accertato che le deformità e le anomalie dell'arco sono correlate alla predisposizione e al rischio di infortunio, in particolare, nel piede con un arco alto si pensa aumenti il rischio di fratture della struttura ossea nella parte laterale del piede (a causa dell'eccessiva supinazione), mentre un arco basso sembra favorire il danneggiamento dei tessuti molli nella parte mediale del piede (a causa dell'eccessiva pronazione). Questi dati sono in parte correlati alla flessibilità dell'arco, anche se ci sono delle eccezioni. Gli archi bassi sono spesso più flessibili e quelli alti più rigidi. Un arco basso flessibile può stirare i tessuti molli nel tentativo di generare un momento sufficiente al distacco delle dita, mentre un arco alto è meno mobile e più soggetto a fratture, in quanto una frattura per carico può insorgere in seguito ad un'attenuazione da shock.

Definizione dei parametri :

- **Indice dell'altezza dell'arco (AHI)** : il rapporto tra l'altezza del mesopiede (H50), che è l'altezza della superficie dorsale del piede calcolata al 50% della sua lunghezza, e la lunghezza dell'arco (AL). ($AHI = H50/AL$)
- **Altezza del navicolare normalizzata (troncata) (NNHt)** : è il rapporto tra l'altezza del navicolare e la lunghezza troncata del piede. L'altezza navicolare è la distanza misurata dalla prominenza più mediale della tuberosità navicolare fino alla superficie del supporto. La lunghezza del piede è troncata misurando la distanza perpendicolare dalla giunzione metatarsale falangeale fino al lato più posteriore del calcagno. L'altezza normalizzata e troncata del navicolare è calcolata dividendo l'altezza della tuberosità navicolare dal suolo (H) per la lunghezza troncata (AL). ($NNHt = H/AL$).

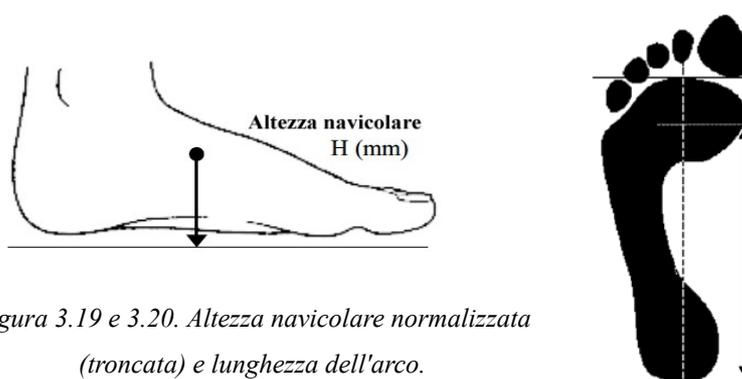


Figura 3.19 e 3.20. Altezza navicolare normalizzata (troncata) e lunghezza dell'arco.

Le misure per quantificare questi indici sono state eseguite su 48 adulti cinesi di Hong Kong (24 uomini e 24 donne) con nessuna deformità visibile o una storia con fratture importanti. Tale studio è stato svolto da Shuping Xiong, “Foot Arch characterization”, Journal of the American Podiatric Medical Association, Febbraio 2010. La distribuzione del campione è riportata in Tabella 3.9.

Variabili	Media	SD	Massimo	Minimo
Uomini (n=24)				
Età (anni)	23,92	4,63	19,00	36,00
Statura (cm)	170,24	6,66	157,00	186,60
Peso (kg)	64,30	16,23	43,20	129,40
BMI	21,98	3,94	17,00	37,16
Lunghezza piede	25,33	1,15	23,28	28,65
Larghezza piede	9,76	0,62	8,53	11,40

Tabella 3.10. Caratterizzazione del campione.

Variabili	Media	SD	Massimo	Minimo
Donne (n=24)				
Età (anni)	22,46	2,50	19,00	27,00
Statura (cm)	160,27	5,27	148,50	169,00
Peso (kg)	54,80	8,73	42,10	76,60
BMI	21,31	3,05	16,85	31,52
Lunghezza piede	23,24	86,00	21,55	24,58
Larghezza piede	9,03	0,48	8,10	9,98

Tabella 3.11. Composizione del campione in base al genere, all'età alla statura, al peso e al BMI. Sono riportati media, deviazione standard (SD), massimo e minimo per ciascun parametro. Vengono inoltre specificati lunghezza del piede e larghezza del piede. Abbreviazioni : BMI, body mass index (calcolato come massa in kg divisa dal quadrato dell'altezza in m).

Sono presentati in Tabella 3.11 la media, la deviazione standard e i valori massimi e minimi per ogni parametro valutato.

Variabili	Media	SD	Massimo	Minimo
Uomini (n=24)				
Indice dell'altezza dell'arco	0,354	0,019	0,322	0,394
Altezza navicolare normalizzata	0,142	0,031	0,088	0,199
Donne (n=24)				
Indice dell'altezza dell'arco	0,352	0,029	0,311	0,416
Altezza navicolare normalizzata	0,140	0,030	0,073	0,185

Tabella 3.12. Statistiche descrittive per l'indice dell'altezza dall'arco e per l'altezza navicolare normalizzata.

La struttura dell'arco varia in base al genere, in particolare l'arco nelle donne ha una maggior lassità nei legamenti e una tendenza alla pronazione, che può essere correlata alla ginocchio valgo e all'arco basso. Nonostante ciò Cavanagh ha dimostrato che non vi è nessuna particolare differenza nell'altezza dorsale tra uomo e donna. Un semplice t test mostra che non vi sono relazioni tra i generi (uomini e donne), così che si possano considerare come unici. Inoltre anche l'età potrebbe essere un fattore discriminante. Una credenza comune è che l'arco tenda ad abbassarsi con l'età. Alcuni studi hanno dimostrato che la tendenza con l'età è quella dell'irrigidimento dei tessuti molli e del formarsi dell'osteoporosi. Questi cambiamenti conducono inevitabilmente alla limitazione della funzionalità del tessuto. C'è una correlazione, seppur debole, tra l'indice dell'altezza dell'arco e la sua

rigidità, infatti ad un indice alto corrisponde un arco più rigido. In fine, la rigidità, può essere messa in relazione anche con la dominanza del piede, che sembrerebbe correlata con l'asimmetria e con il relativo tentativo da parte del corpo di compensare gli equilibri.

Capitolo 4

VALUTAZIONE DELLA MORFOMETRIA GENERALE DEL PIEDE IN FUNZIONE DI PARTICOLARI PATOLOGIE: PIEDE PIATTO E CAVO

Dopo aver trattato i valori di interesse per la valutazione del piede in condizioni normali, procediamo nel trattare due casi patologici ritenuti significativi: il piede cavo e il piede piatto. In particolare, si vogliono rivedere alcuni concetti esposti sopra alla luce delle deformazioni a cui sono soggetti il piede cavo e il piede piatto ed eseguirne un confronto. Si cerca inoltre di individuare quali paramenti identifichino i vari tipi di piede ,soffermandosi sui valori relativi all'arco plantare.

4.1 Il piede cavo

Il piede cavo fu descritto per la prima volta nella letteratura americana nel 1885 da Shaffer. Il termine descrittivo “*piede cavo*” sintetizza un largo spettro di possibili deformazioni del piede, che possono variare per l'eziologia e la forma con la quale si presentano clinicamente, ma che hanno tutte in comune un arco longitudinale particolarmente alto. La mancanza di uniformità rende la trattazione di questo tema e i necessari confronti alquanto difficoltosi. Il piede cavo è definito come una deformità caratterizzata da un'esagerata concavità dell'arcata plantare, accompagnato da una conseguente prominente dorsale e da un possibile atteggiamento a griffe delle dita. È una patologia molto diffusa, più del piede piatto; predilige il sesso femminile

nel quale può manifestarsi anche precocemente. La deformità del piede cavo si presenta raramente in bambini piccoli (di età inferiore ai 3 anni), ma può svilupparsi quando il bambino cresce. Nei casi in cui lo squilibrio motorio inizia prima della maturazione dello scheletro, ci possono essere cambiamenti sostanziali nella morfologia delle ossa sane; se invece la patologia del piede cavo è acquisita dopo la maturità scheletrica, la variazione nella morfologia è contenuta.

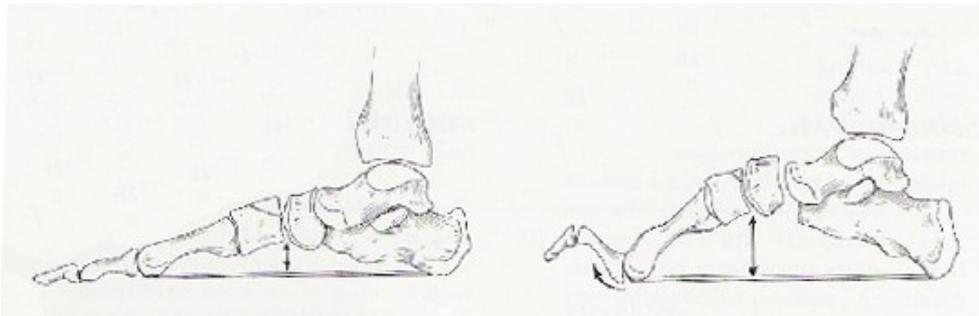


Figura 4.1. Sono messi a confronto un piede con arco normale e un piede cavo.

Le caratteristiche generali che contraddistinguono un piede cavo sono:

- calcagno varo;
- avampiede equino addotto;
- supinazione (appoggio sulla colonna esterna) ;
- retrazione a griffe delle dita ;
- instabilità in inversione del piede.

Il piede cavo è un piede rigido e poco ammortizzato, risulta instabile nell'appoggio in supinazione ed è quindi caratterizzato da frequenti episodi di cedimento in inversione. Presenta un sovraccarico della 1° e della 5° testa metatarsale con la presenza di ulcerazioni plantari. La retrazione a griffe delle dita è progressiva, accompagnata e dovuta a rigidità articolari e verticalizzazione delle teste dei metatarsi centrali, che provocano metatarsalgia centrale. E' inoltre soggetto all'**iperostosi** calcaneale, cioè ad un'eccessiva proliferazione della matrice ossea, da cui deriva un aumento della densità scheletrica, dovuta a entesopatie achillee (alterazione artritica di un'entesi che è l'inserzione di un tendine in un osso, zona dove le fibre di

collagene sono mineralizzate e integrate nel tessuto osseo).

Dal punto di vista eziopatologico possiamo distinguere tra :

- **piede cavo essenziale**, nel quale vi è l'aumento dell'arcata plantare, ma l'assenza totale di una patologia che possa essere in qualche modo responsabile del cavismo;
- **piede cavo neurologico**, causato da lesioni del sistema nervoso centrale e periferico, con alterazioni delle vie afferenti ed efferenti, frequente conseguenza di sindromi compartimentali e di malattie neurologiche, come la malattia di Charcot-Marie-Tooth (CMT), la malattia di Friederich o la spina bifida. È dovuto ad uno squilibrio muscolare che provoca paralisi del muscolo o contrattura dell'antagonista. Due terzi dei pazienti adulti con il sintomo del piede cavo hanno una patologia neurologica, nella maggior parte dei casi la sindrome di CMT.
- **piede cavo secondario**, dove il cavismo è condizionato da retrazioni osteoarticolari o da retrazione delle parti molli, a livello dell'appoggio plantare. Le cause estrinseche, però, non provocano l'instaurarsi del piede cavo se non quando agiscono su una pianta predisposta; fanno scattare così uno squilibrio latente o ne aggravano uno persistente.

Non c'è un fattore o un'associazione di fattori comuni a tutti i casi di piede cavo, un attento esame fisico è solitamente utilizzato per capire quali siano i fattori in atto e come possa evolvere la malattia. Tra tutte le cause elencate sopra, quella che ha suscitato maggior interesse è la malattia neurologica di Charcot-Marie-Tooth. Tale disturbo è stato descritto per la prima volta in Germania, Francia ed Inghilterra nella tarda metà del diciannovesimo secolo. La malattia di CMT anche detta Hereditary Motor and Sensory Neuropathy (HMSN) è la causa più comune del piede cavo e uno dei più discussi modelli che coinvolgono le forze di deformazione. È una sindrome neurologica ereditaria a carico del sistema nervoso periferico, si presenta con due fenotipi principali caratterizzati da debolezza distale e deformità, con riflesso alla sollecitazione assente o diminuito. Il tipo 1, detta CMT “demielinizzante” è associata alla lentezza nella conduzione nervosa che arriva fino al 60% rispetto ai valori

normali. Nel tipo 2, la forma “assonica” della malattia, la velocità di conduzione è normale, o poco ridotta, i riflessi da stiramento sono meglio preservati e non c'è ipertrofia dei nervi. In generale provoca perdita di tono muscolare e di sensibilità dal ginocchio in giù negli arti inferiori e dal gomito in giù in quelli superiori.

Cause di insorgenza del piede cavo	Sindrome di Guillain-Barre
<i>Neuromuscolari :</i>	Neurite intestinale ipertrofica infantile
HMSN	Idrocefalo occulto
Mielodisplasia	Tumore al nervo sciatico
Poliomielite	<i>Congenite :</i>
Atassia di Freidreich	Artogriposi
Plasia cerebrale	Traumatiche:
Tumore al midollo spinale	Fibrosi da sindrome post compartimentale
Distrofia muscolare	Plasia peroneale
Degenerazione spinale-cerebellare	Malunione da frattura
Siringomielia	<i>Idiopatiche:</i>
Atrofia spinale muscolare	Scoliosi idiopatica
Malattia cerebellare primaria	
Sclerosi multipla	

Tabella 4.1. Possibili cause del piede piatto.

Come la causa del piede cavo può variare, così varia anche la sua presentazione clinica. Alcune persone possono essere asintomatiche come altre pesantemente affette. Il piede cavo sintomatico è accompagnato da dolore, in quanto, il piede in inversione, perde le sue proprietà di assorbimento degli urti, ricorrono le torsioni della caviglia, c'è l'effetto trepiede, cioè una diminuzione della superficie che poggia a terra, e il piegamento delle dita. Lamenti moderati includono la difficoltà nel calzare le scarpe. Il piegamento delle dita può produrre dolorose callosità oltre le giunture dorsali (PIP) derivate dal contatto con la scarpa. Il piede cavo-varo è caratterizzato dalla flessione del raggio plantare, dalla pronazione dell'avampiede, da un retropiede varo, da una fascia plantare ristretta, dalla paralisi dei muscoli intrinseci, dalla paresi del peroneo breve e del tibiale anteriore; è altresì frequente il piegamento delle dita. Può essere causato da deformità dell'avampiede e dal

meccanismo a leva della fascia plantare. La fascia plantare si sviluppa dalla tuberosità calcaneale, fino ai legamenti metatarsali trasversi, per arrivare alla base delle falangi prossimali. La porzione mediale e centrale risultano più resistenti. Essa svolge la funzione di stabilizzare l'arco e invertire il retropiede nella fase di appoggio del tallone. Ha la funzione di assorbire gli urti tramite i quadricipiti e di provvedere all'eversione del calcagno durante l'appoggio del piede.



Figura 4.2 e 4.3. Piede cavo e dimostrazione del funzionamento del meccanismo a leva della fascia plantare.

La complessità della struttura del piede rende difficile la comprensione della deformazione dovuta al piede cavo, in quanto questa si sviluppa in modo tridimensionale. È allora opportuno proporre un'analisi in più parti, che studi la modificazione del piede da diverse prospettive.



Figura 4.4. Vista sagittale. Mostra l'iper flessione plantare del primo raggio, è evidente la posizione del navicolare, localizzato sulle superfici superiore e mediale del talo.

La vista laterale mostra come nel piede cavo ci sia la tendenza dell'osso navicolare a sovrastare il cuboide.

Nel piano sagittale, la deformità può essere classificata come posteriore, anteriore o come una combinazione delle due. La **deformità posteriore** (retropiede cavo o calcagno cavo) è associata all'orientamento verticale del calcagno e coinvolge frequentemente una componente vara. La deformità può essere inoltre secondaria all'indebolimento del complesso gastrocnemico (complesso muscolare atto a rallentare la caduta del corpo in avanti) o alla poliomielite. Con il radicarsi di questo disturbo, altre cause sono diventate con il tempo predominanti, come la plasìa cerebrale (CP) e l'HMSN. Le **deformazioni della parte anteriore** coinvolgono la flessione plantare del mesopiede e dell'avampiede e spesso comprendono una componente adduttiva. La flessione può coinvolgere l'intero piede (globale) oppure in modo particolare il primo e il secondo metatarso (localizzata). Una **deformità combinata o mista** coinvolge entrambe le componenti, anteriore e posteriore.



Figura 4.5. Modello tridimensionale del piede cavovaro. Vista dall'alto, si nota il quasi completo sormontamento del talo e del calcagno, il navicolare è forzato in direzione mediale.

Una seconda classificazione può avvenire rispetto al piano trasversale secondo la direzione del tallone, nella porzione media del tarso e a livello delle dita.

Secondo la direzione del tallone ci può essere:

varismo del retropiede, secondario ad una verticalizzazione della prima testa

metatarsale, che a contatto con il suolo costringe il retropiede a ruotare in supinazione, o alla presenza di ipertonìa dei muscoli tibiale anteriore e posteriore, che implica la deformità denominata piede cavo varo;

valgismo del retropiede, quando esiste un importante valgismo del calcagno, esso trascina in pronazione anche il cuboide allontanandolo dal suolo; ormai paragonato ad un vero piede piatto, questo tipo di piede dà un'immagine podografica di un piede cavo, ma funzionalmente si comporta come un piede piatto.

Nella porzione media del tarso possiamo valutare l'apice dell'arcata e la zona dell'appoggio plantare. A livello delle dita si valuta se la deformità a griffe interessa tutte le dita o solo l'alluce.



Figura 4.6. Modello tridimensionale del piede cavo. Visione frontale anteriore, si nota la rotazione del piede e il varismo dell'avampiede in relazione al retropiede. In questo modello è chiara la drammatica flessione plantare del primo raggio.

La giunzione di Chopart (articolazione *medio-tarsica* : astragalo-scafoidea + calcaneo-cuboidea) si articola facilmente quando il retropiede è in inversione, cioè in condizione di appoggio del tallone, nel pieno appoggio prevale invece l'eversione, atteggiamento che consente l'assorbimento degli shock, così che il retropiede scorra correttamente, e avvenga il distacco delle dita. In condizioni normali l'osso navicolare si muove in direzione mediale rispetto al cuboide, nel piede cavo invece il navicolare tende a sovrastare il cuboide, riducendo l'angolo talo-calcaneare. Questo rende difficile il funzionamento della giunzione di Chopart.

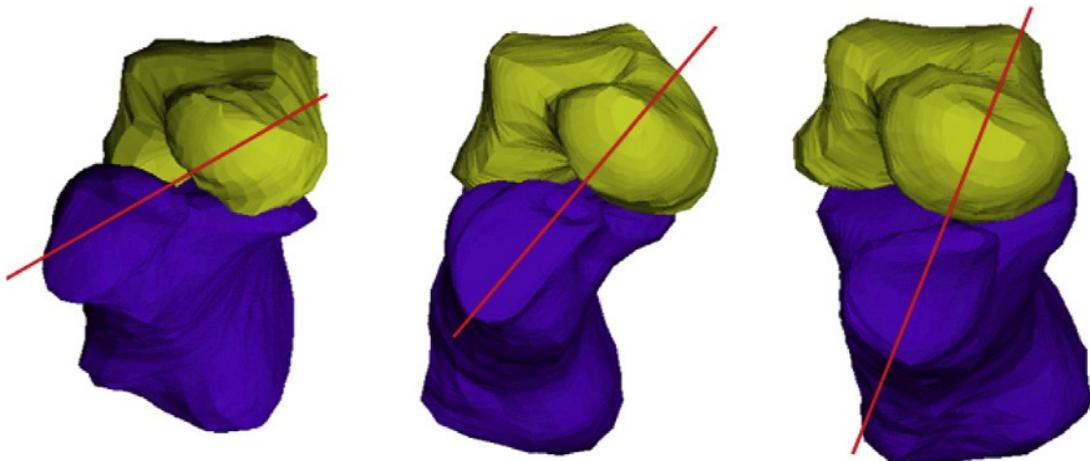


Figura 4.7. Visione frontale della giunzione di Chopart in tre pazienti aventi piede cavo, normale e piatto. In verde è rappresentato il talo, in blu il calcagno. Il tarso e il metatarso sono stati tolti. La linea rossa indica un asse approssimativo dei due assi combinati talo-navicolare e calcaneo-cuboideo. Si nota come il piede cavo ha un asse che blocca la giunzione di Chopart.

Durante il ciclo del cammino il piede rimane bloccato nella fase di appoggio, in posizione di inversione del retropiede e di avampiede varo, e ciò causa una minor dissipazione dei carichi, che può sfociare in una metatarsalgia, in fratture da tensione del quinto metatarso, in fasciti plantari, in dolori dell'arco mediale longitudinale, nella sindrome del complesso ilio-tibiale e nell'instabilità. Questo bloccarsi e sbloccarsi della giunzione di Chopart costituisce un elemento critico nel piede cavo. Il talo è l'elemento che congiunge il piede e la caviglia. In un piede naturale o piatto, il piede ruota attorno al talo; l'osso cuboide segue il calcagno. Nel piede cavo dovuto a cause neuromuscolari, il calcagno è ruotato internamente al di sotto del talo facendo risultare ristretto l'angolo talo-calcaneale anteriore-posteriore. Visto che l'osso cuboide segue i movimenti del calcagno, il cuboide risulta in posizione plantare rispetto al navicolare e non dietro a questo. Questo blocca il mesopiede e sovraccarica la parte laterale del piede. Se un asse disegnato tra le due giunture è parallelo al terreno, ci sarà una flessione relativamente libera. Altrimenti se l'asse ha un orientamento verticale è possibile una minor libertà. Il crescente squilibrio muscolare, se non trattato, converte una deformità del piede flessibile a una deformità fissa. Nel piede invertito o cavo-varo gli assi di rotazione delle giunture mediotarsali

sono divergenti, la giuntura subtalare è nella posizione rigida e in più il movimento del complesso subtalare/mediotarsale è significativamente ridotto.

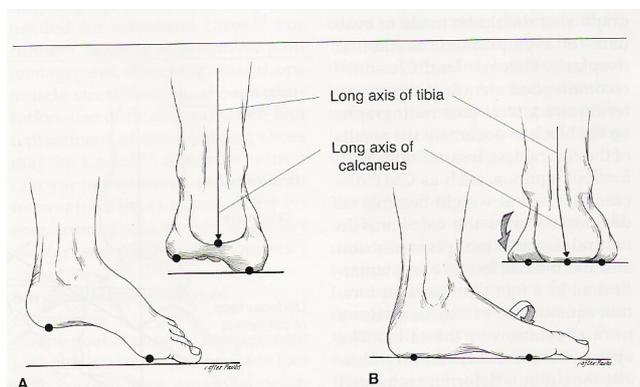


Figura 4.8. Piede cavo.

La forma cava è associata a dei cambiamenti nella meccanica del piede, che diviene meno flessibile e meno bilanciato di un piede normale. Argomento di interesse è come avvenga il bilanciamento tra i muscoli intrinseci ed estrinseci nel caso di un piede cavo. Però, come il meccanismo che causa il piede cavo varia in base ai vari decorsi della patologia, così il tentativo di trovare un tipo di bilanciamento comune non porta a un risultato apprezzabile. Il piede cavo può essere frutto di più di un meccanismo di bilanciamento muscolare e la maggior parte delle deformazioni coinvolgono anomalie di muscoli sia intrinseci che estrinseci. Un'analisi della CMT aiuta nella valutazione delle varie componenti della deformazione del piede cavo. La debolezza nel CMT si pensa derivi dai muscoli intrinseci. Prince e colleghi hanno svolto una tomografia computerizzata (CT) nei muscoli di pazienti con piede cavo, trovando che i muscoli intrinseci hanno un precoce e accentuato indebolimento. Questa debolezza intrinseca può portare al piegamento a griffe delle dita e la combinazione dell'effetto leva e della fibrosi (accorciamento) dei muscoli intrinseci può portare all'accorciamento dell'arco longitudinale. In ogni caso Dwyer sostiene che la debolezza intrinseca da sola non costituisca uno dei maggiori fattori nella formazione del piede cavo e che la deformazione si possa presentare anche senza il piegamento a griffe delle dita. Se è presente il piegamento, può spingere lo strato di grasso plantare posizionato in modo distale sotto le teste metatarsali.

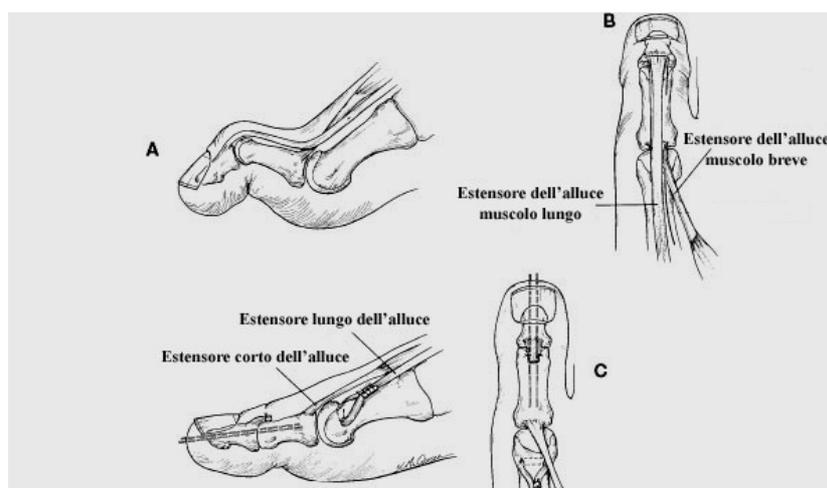


Figura 4.9. Piegamento a griffe delle dita e muscoli estensori dell'alluce.

L'estensore lungo delle dita è utilizzato come sostituto del dorsiflessore della caviglia e questo muscolo agisce contro l'intrinseco debole in aggiunta al piegamento a griffe, peggiorando l'effetto leva e alzando ulteriormente l'arco. Un fattore importante nella CMT è la debolezza del muscolo tibiale anteriore (che flette dorsalmente, adduce (supina) e ruota medialmente il piede), mentre il peroneo lungo (suo antagonista) è relativamente ben preservato. Da studi svolti sulla MRI fatti da Helliwell e colleghi, e dalla biopsia del muscolo in pazienti con il piede cavo, si è notata un'atrofia del tibiale anteriore e un'ipertrofia del peroneo lungo in tutti i casi trattati. Il peroneo lungo, lavorando come antagonista di un anteriore tibiale inefficiente, provoca una flessione plantare del primo metatarso esagerata. Questa flessione plantare del primo raggio produce un'avampiede valgo, o pronazione, che forza il retropiede ad essere varo. Il tibiale posteriore (flette plantarmente, adduce (supina) e partecipa ai movimenti di rotazione interna del piede), invece, rimane forte ed è contrastato dal peroneo breve indebolito, che spinge ulteriormente il retropiede ad essere varo. Questa deformazione del piede in varo può essere aggravata da molti fattori, la spinta del tendine di Achille diventa più mediale, aumentando il calcagno varo, la fascia plantare si contrae e il suo attaccamento mediale al calcagno tende ad invertirlo. C'è anche una tendenza a camminare con il bordo laterale del piede che peggiora il problema. Nella deformità del calcagno cavo, la debolezza del compartimento

posteriore è il fattore predominante, l'assenza di un flessore plantare forte del calcagno si esplica in una dorsiflessione calcaneale con un avampiede relativamente normale. Con il tempo, l'effetto del mancato bilanciamento di questi muscoli causa una deformazione permanente. Nel paziente che non possiede ancora uno scheletro maturo, tale mancato bilanciamento risulta nel cambiamento della struttura ossea con la crescita. Gli adulti possono sviluppare delle contratture dei tessuti molli che provocano deformazioni irreversibili. In associazione al decrescere dell'area di contatto nel piede cavo, questo sovraccarica il calcagno e le teste dei metatarsi causano la formazione di calli e dolore. Questa caratterizzazione e forma del piede rendono il piede poco adatto a sforzi atletici o anche a fatiche minori, come la camminata o la posizione in piedi per lunghi periodi di tempo. L'instabilità della caviglia è un'altra caratteristica comune. La combinazione di un allineamento varo del retropiede e una debole stabilizzazione dinamica (es. peroneo breve) può portare ad una caviglia funzionalmente instabile, che si può manifestare come una torsione multipla della caviglia. Questa instabilità, e l'accentuata deformazione, possono portare con il tempo alla degenerazione della giuntura.

4.2 Il piede piatto

Per piede piatto si intende un'alterazione morfologica del piede, caratterizzata da valgismo del retro-piede e dalla diminuzione dell'arcata plantare. Il mantenimento dell'arcata plantare dipende da un'adeguata interazione tra gli elementi muscolari, legamentosi ed ossei, sottoposti alla regolazione del sistema nervoso, che mantiene il tono muscolare e garantisce la coordinazione dei movimenti. Il cardine di tale deformità è a livello del retropiede, costituito da due ossa, calcagno e astragalo, a contatto tra di loro per mezzo di un'articolazione chiamata sottoastraglica. L'astragalo, osso che raccorda tutto il piede allo scheletro della gamba, normalmente posto sopra al calcagno, scivola verso il basso, in avanti e internamente, trascinando con se tutte le ossa ad esso connesse anteriormente e costringendo il calcagno a ruotare. Questo movimento di rotazione interna del retropiede prende il nome di

pronazione. La conseguenza clinica é la classica forma del tallone, che risulta deviato verso l'interno, con l'asse della gamba a livello del malleolo tibiale debordante internamente fuori dalla zona di appoggio del piede. La pronazione del retropiede ha ripercussioni anche sull'avampiede: la caduta dell'astragalo schiaccia infatti la testa del primo metatarso contro il pavimento, facendolo sollevare per reazione con il suolo, provocando una deformazione in extrarotazione di tutto l'avampiede che prende nome di supinazione.

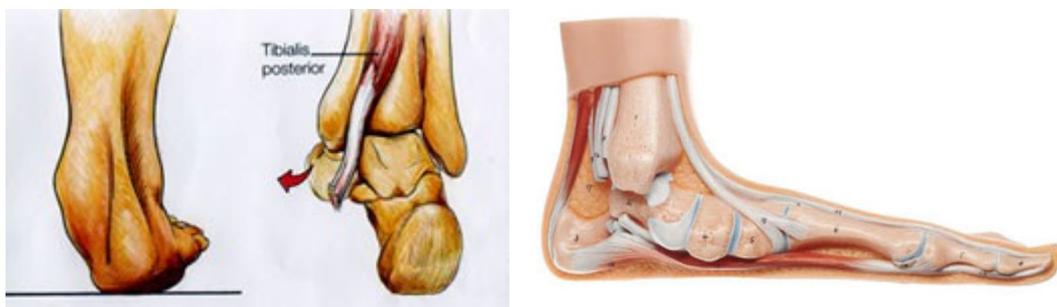


Figura 4.10. Piede piatto.

La somma di tutte queste deformità può essere paragonata secondo la teoria di Paparella Treccia, ad un piede che subisce un movimento elicoidale, sovrapponibile al doppio giro che realizzano le pale dell'elica di un aereo. La rotazione interna (pronazione) del retropiede e la successiva esterna (supinazione) dell'avampiede provocano quindi la scomparsa della volta e la caratteristica caduta dell'arco longitudinale interno. A fini illustrativi potremmo dire che il piede piatto non è un ponte che si avvalla, ma un'elica che si svolge. La zona neutra, punto di passaggio tra la pronazione e la supinazione, varia a seconda del tipo di piede piatto, in dipendenza dai meccanismi che sono intervenuti nello sviluppo. Esistono tre livelli:

- 1) A livello dell'articolazione *astragalo-scafoidea* e *scafo-cuneiforme*: secondaria ad una lassità che interessa tutte le strutture del piede (piede lasso infantile).
- 2) A livello dell'articolazione *scafo-cuneiforme*: si verifica nel piede piatto paralitico, infatti la paralisi del tibiale posteriore fa sì che lo scafoide non

opponga nessuna resistenza ad essere trascinato in avanti dall'astragalo. In condizioni normali, infatti, il muscolo tibiale posteriore è in grado di richiamare in basso ed indietro lo scafoide. In risposta il cuneiforme ed il primo metatarso si sollevano e l'alluce, per toccare il suolo, deve flettersi.

- 3) A livello dell'articolazione *astragalo-scafoidea*: dato dal piede piatto causato da un astragalo verticale congenito.

La caduta della volta plantare ha come diretta conseguenza la distribuzione anomala delle forze di carico sulle ossa e sui tendini, con sovraccarico di tutta la zona interna del piede, il cosiddetto piede astragalo, deputato alla funzione ammortizzante. Il perpetuarsi di tale condizione, determina a lungo andare la degenerazione della struttura, in particolare del tendine del muscolo tibiale posteriore deputato a sostenere la volta e dell'articolazione *astragalo-scafoidea*. Tale degenerazione sarà tanto più accentuata, quanto più grave sarà stata la deformità di partenza, fino alla rottura del tendine e all'artrosi delle ossa mediali del piede, con l'instaurarsi di una sindrome dolorosa a tale livello. Questa sindrome compare nelle donne più frequentemente che negli uomini, in una fascia di età intorno ai 50-60 anni; non è mai un evento improvviso ma graduale e progressivo.

Piede piatto dal punto di vista eziologico

Piede piatto da alterazioni ossee:

- piede piatto da astragalo verticale congenito;
- piede piatto da alterazione dello scafoide;
- piede piatto da sinostosi ossea.
- piede piatto post-traumatico (fratture del calcagno e dello scafoide).

Piede piatto da alterazioni muscolo-legamentose:

- piede piatto lasso infantile;
- piede piatto da malattie endocrine;
- piede piatto nelle artriti reumatiche;

- piede piatto nelle affezioni sistemiche.

Piede piatto da alterazioni neuromuscolari:

- piede piatto da miopatie;
- piede piatto da paralisi flaccida;
- piede piatto da paralisi spastica;
- piede piatto da retrazioni del tendine d'Achille.

Piede piatto da astragalo verticale congenito

Anche detto piede a dondolo. Si tratta di una malformazione congenita del piede, nella quale lo scafoide è lussato verso l'alto, e l'astragalo è verticale. Con grande probabilità si tratta di un arresto dell'evoluzione provocato da un agente sconosciuto nel momento in cui l'astragalo è completamente verticale, al 2° mese di vita uterina.

Il piede piatto nel bambino o piede lasso infantile

Quando il bambino inizia a camminare, l'immaturità del tessuto connettivo e lo scarso sviluppo dei muscoli permettono un'ampia escursione dei movimenti ammortizzanti del piede, con l'appiattimento della volta ad ogni passo. Questo fenomeno iniziale non è un fenomeno di insufficienza ma un importante elemento di apprendimento. La volta che si appiattisce permette infatti di toccare o di sfiorare il suolo ad una serie di elementi riflessogeni posti nella pianta del nostro piede, i quali inviano informazioni cosiddette propriocettive ai centri nervosi, che a loro volta azionano, per via riflessa spinale, i muscoli deputati alla creazione e al mantenimento della volta, informandoli della quantità e della forma che ad essa devono conferire. Quando per cause ancora non perfettamente note si verifica un rallentamento o un inceppamento di questi meccanismi, per cui la volta plantare tarda ad assumere la sua forma e dimensione normale, o non si forma affatto, ci troviamo allora di fronte ad un piede piatto. Fino all'età di 2-3 anni non si deve intraprendere alcunché su questo tipo di piede, infatti si tratta di falso piede piatto dovuto all'aumento del pannicolo adiposo della pianta del piede. Dai 2-3 anni ai 9-10, si tratta in genere di soggetti iperlassi che di solito presentano ginocchio valgo e segno di Rotes positivo (iper-

estendibilità dei gomiti, delle ginocchia, dei pollici ecc).

4.3 Effetti della tipologia di piede sui parametri antropomorfometrici

L'insorgere di alcune patologie, come ad esempio il piede cavo e il piede piatto, comporta una variazione della struttura antropometrica e della funzionalità dal piede. Tale variazione provoca modificazioni, anche importanti, a livello dell'arco mediale longitudinale. È quindi interessante quantificare come cambi la struttura di quest'arco in relazione alle patologie considerate, per valutarne meglio le caratteristiche distintive. Ai fini della classificazione non sono stati considerati solo i parametri morfometrici descritti nei capitoli precedenti, bensì anche degli indici, ossia i rapporti tra le misure. Ci sono molti indici che servono per quantificare l'arco del piede e tra questi vi sono :

- *Parametri riferiti all'impronta del piede*, come l'indice dell'arco, l'indice di lunghezza dell'arco, l'angolo dell'arco o dell'impronta, l'indice dell'impronta, l'indice dell'arco troncato, l'indice dell'arco modificato ecc;
- *Indici correlati alla postura* come l'indice di valgismo, e l'indice del malleolo valgo;
- *Indici correlati alle dimensioni* come l'indice dell'altezza dell'arco o indice dell'altezza del navicolare;
- *Indici correlati agli angoli* come l'angolo dell'arco longitudinale, l'angolo di inclinazione del calcagno e l'angolo tra il calcagno e il primo metatarso;
- *Indici correlati con la funzione del piede.*

Sono state utilizzate varie tecniche per quantificare gli indici relativi al piede e tra queste vi sono: determinazione dell'impronta del piede, la mappa di pressione, le immagini radiografiche, le immagini ad ultrasuoni e l'osservazione. L'affidabilità di ciascuno di questi indici è stata discussa in letteratura e, nonostante la tecnica

dell'impronta sia stata largamente sfruttata, presenta delle limitazioni. Alcune di queste sono state superate con lo sviluppo delle tecniche di mappatura pressoria. L'impronta del piede di per sé non costituisce un buon indicatore per determinare e classificare la varie tipologie di piede, in quanto non tiene conto di tutti i fattori. Infatti Cobey e Sella affermano che piedi con una medesima struttura possono avere impronte differenti a causa del contributo dei tessuti molli. Così non sorprende che Wearing e colleghi abbiano scoperto che l'indice dell'arco è più una misura di massa corporea che non di un piede piatto. Infatti, l'indice dell'arco può descrivere approssimativamente il 50% della variazione dell'altezza dell'arco, mentre lascia indeterminato il restante 50%.

Di seguito sono descritti gli indici più utilizzati per operare una classificazione tra le tre tipologie di piede, che considerano la distribuzione del carico su entrambi i piedi.

Indici correlati all'area

- **Indice dell'arco (AI)** : il rapporto tra l'area del terzo mediano e l'area dell'impronta del piede senza le dita.

L'indice dell'arco dall'impronta di inchiostro e l'indice dell'arco dall' F-scan sono usati per rappresentare AI da immagini con inchiostro e impronte di pressione, rispettivamente.

- **Indice dell'impronta di inchiostro (FI)** : rapporto tra l'area di non contatto e l'area di contatto dell'impronta di inchiostro escluse le dita $FI = A / (B1+B2+B3)$.

Indici correlati con la forza

- **Indice dell'arco modificato** : il rapporto tra la forza plantare nel terzo mediano del piede e la forza totale sul piede.

Indici correlati con l'osservazione visiva

- **Subjective ranking** : basato sulla diretta osservazione delle immagini del piede.

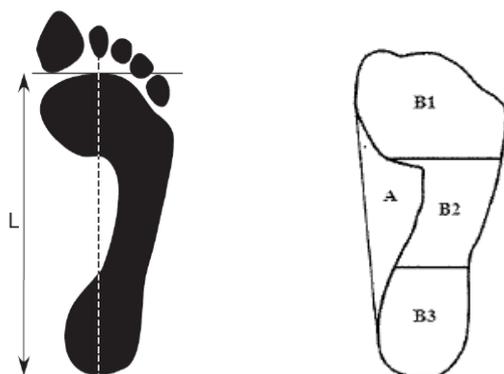


Figura 4.11. Indice dell'Arco. Impronta del piede con linee di riferimento per il calcolo dell'indice dell'arco. La lunghezza del piede (escluse le dita) è divisa in tre parti uguali per delimitare le tre regioni : A – avampiede; B – mesopiede; e C – retropiede o calcagno. L'indice dell'arco è così calcolato dividendo l'area del mesopiede (B2) per l'intera impronta. (Indice dell'Arco = $B2 / [B1+B2+B3]$).

Indici correlati con la postura

- **Indice del malleolo valgo** : lo spostamento del malleolo mediale nel piano frontale in relazione con l'area di supporto della superficie del calcagno.

Angoli di interesse da radiografia antero-posteriore

- **L'angolo di copertura talo-navicolare** : è formato dal segmento passante per i due estremi anteriori della testa del talo e dal segmento passante per la superficie prossimale della faccia articolare del navicolare.

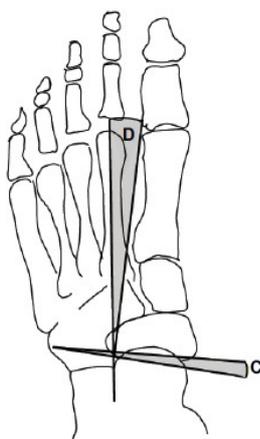


Figura 4.12. Angolo di copertura talo-navicolare e angolo tra talo e secondo metatarso.

- **L'angolo tra il talo e il secondo metatarso** : è formato dall'asse longitudinale del secondo metatarso e dal segmento perpendicolare alla linea che connette gli estremi della testa del talo. Gli angoli misurati dalla vista A-P riflettono l'allineamento sul piano trasversale del mesopiede e dell'avampiede. L'angolo tra talo e navicolare e l'angolo tra talo e secondo metatarso, se risultano maggiori della media, indicano la presenza del piede piatto.

Angoli di interesse da radiografia laterale

- **L'angolo di inclinazione del calcagno** : è l'angolo tra la superficie passante per le tuberosità inferiori del calcagno e la superficie di supporto (Figura 4.13).
- **L'angolo tra il calcagno e il primo metatarso** : è l'angolo formato dalla superficie passante per le tuberosità inferiori del calcagno e la linea parallela al dorso del primo metatarso. Gli angoli della visione laterale riflettono l'allineamento, nel piano sagittale, dell'avampiede e del retropiede; se l'angolo tra calcagno e primo metatarso è maggiore della media indica la presenza del piede piatto (Figura 4.13).

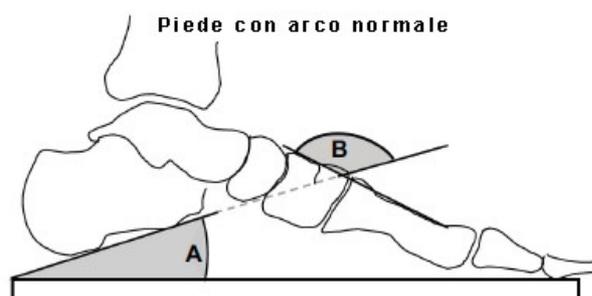


Figura 4.13. Angolo di inclinazione del calcagno e angolo tra calcagno e primo metatarso.

- **Angolo dorsale del mesopiede (α)** : l'inclinazione rispetto all'orizzontale del primo giunto metatarsale, nell'area del mesopiede.

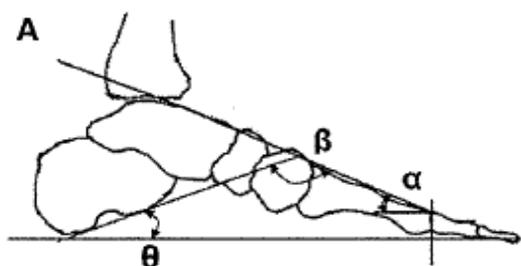


Figura 4.14. Rappresentazione dell'angolo di inclinazione del calcagno (θ), dell'angolo tra il calcagno e il primo metatarso (β) e dell'angolo dorsale del mesopiede (α).

Il navicular drop test (indice del grado di pronazione) ha guadagnato consensi negli ultimi anni anche se l'affidabilità è considerata moderata, in quanto ha un'eccellente validità nella valutazione dell'arco mediale longitudinale, anche se questo deve essere considerato in relazione alla grandezza del piede. La misura dell'angolo dorsale del mesopiede sembra superare queste critiche e fornire informazioni simili al navicular drop test.

L'indice dell'altezza dell'arco dipende in larga misura dall'altezza della giuntura del primo metatarso e quindi dall'angolo dorsale del mesopiede (α) (Figura 4.14) che sembra essere uno strumento altrettanto soddisfacente al fine di operare la classificazione dell'arco. L'angolo dorsale del mesopiede, come si nota in Figura

4.14, corrisponde a : [180 – l'angolo di inclinazione del calcagno (θ) – l'angolo tra calcagno e primo metatarso (β)], dove gli angoli θ e β , determinati dalle radiografie, sono usati per quantificare l'arco. L'*angolo dorsale del mesopiede* influenza la determinazione della tipologia dell'arco e può potenzialmente essere un contributo, oltre all'indice dell'altezza dell'arco per determinare l'altezza dell'arco stessa.

Nell'approccio qui trattato vengono utilizzate sei variabili indipendenti, che sono sei misure comuni utili per quantificare l'altezza dell'arco. Basandosi poi su questi sei misure, vengono identificate nove variabili dipendenti: *l'indice dell'altezza dell'arco, l'altezza navicolare normalizzata, l'indice dell'arco dall'impronta del piede con l'inchiostro, l'indice dell'arco dall'impronta del piede di un'immagine pressoria (F-scan), l'indice dell'impronta, l'indice dell'arco modificato, subjective ranking, indice del malleolo valgo e l'angolo dorsale del mesopiede*. Tutte queste misure sono reperite in posizione di bilanciamento statico. Altrettanto importanti sono le 6 dimensioni : *lunghezza del piede, larghezza del piede, lunghezza dell'arco, altezza del mesopiede, altezza navicolare, e l'angolo dorsale del mesopiede*. Per la determinazione quantitativa dei parametri sopra esposti è stato utilizzato lo stesso campione descritto per le misure relative all'arco nel Capitolo 3, "Foot Arch characterization", Shuping Xiong et al., "Journal of the American Podiatric Medical Association", Febbraio 2010. Il campione viene riportato anche in Tabella 4.2 :

Variabile	Media \pm SD		
	Arco alto(n = 12)	Arco normale (n = 24)	Arco basso(n = 12)
Età (anni)	23.75 \pm 3.47	22.58 \pm 4.33	23.83 \pm 2.72
Statura (cm)	165.25 \pm 8.57	165.02 \pm 7.28	165.72 \pm 8.63
Peso (Kg)	56.83 \pm 2.68	58.83 \pm 9.37	63.72 \pm 21.52
BMI	20.63 \pm 2.68	21.58 \pm 3.08	22.79 \pm 4.77
Contenuto di grasso (%)	23.60 \pm 6.81	25.93 \pm 8.41	24.42 \pm 8.13
Lunghezza del piede (cm)	23.90 \pm 1.39	24.11 \pm 1.44	25.00 \pm 1.43
Lunghezza dell'arco (cm)	17.00 \pm 1.04	17.19 \pm 0.95	18.09 \pm 1.10*
Larghezza del piede (cm)	9.12 \pm 0.60	9.43 \pm 0.67	9.61 \pm 0.67
Altezza del mesopiede (cm)	6.30 \pm 0.43	6.08 \pm 0.44	6.02 \pm 0.60
Altezza navicolare (cm)	2.81 \pm 0.40*	2.53 \pm 0.33*	1.87 \pm 0.38*

Tabella 4.2. Composizione del campione in base all'età, alla statura, al peso e al BMI. Vengono riportati i valori per alcune delle sei misure di interesse. Sono riportati media e deviazione standard (SD) per ciascun parametro.

In seguito sono riportati i dati corrispondenti ai valori degli indici fino ad ora considerati. Sono divisi per categoria, per ognuna della quali è riportata media e deviazione standard.

Variabile	Media \pm SD		
	Arco alto(n=12)	Arco normale (n=24)	Arco basso(n=12)
Indice dell'arco da F-Scan	0.127 \pm 0.07	0.206 \pm 0.05	0.278 \pm 0.04
Indice dell'impronta	0.417 \pm 0.04	0.334 \pm 0.04	0.185 \pm 0.07
Indice dell'arco modificato	0.047 \pm 0.04	0.104 \pm 0.05	0.158 \pm 0.05
Indice dell'altezza dell'arco	0.371 \pm 0.02	0.354 \pm 0.02	0.332 \pm 0.02
Altezza navicolare normalizzata	0.165 \pm 0.02	0.147 \pm 0.02	0.104 \pm 0.02
Subjective ranking	1.250 \pm 0.45	1.920 \pm 0.41	2.670 \pm 0.49
Indice del malleolo valvo	11.160 \pm 4.94 ^b	11.330 \pm 4.26 ^b	14.370 \pm 4.67 ^b
Angolo dorsale del mesopiede	27.080 \pm 1.98	24.950 \pm 1.92	22.500 \pm 1.72

Tabella 4.3. Parametri di classificazione del piede.

L'indice dell'arco, calcolato tramite impronta di inchiostro, mostra una correlazione da moderata ad alta con tutte le misure, eccetto per l'indice del *malleolo valgo*. Per questo motivo è stato usato per classificare il piede nelle tre categorie : arco alto, normale e basso. Il piede può essere quantificato attraverso tre quartili, per cui l'indice dell'arco risulta minore di 0,217 per piedi con arco alto, da 0,217 a 0,261 per l'arco normale, e 0,261 o maggiore per l'arco basso.

Tipo di piede	Arco alto	Arco normale	Arco basso
Indice dell'arco	< 0,217	0,217 – 0,261	> 0,261

Tabella 4.4. Valori medi dell'indice dell'arco per il piede con arco basso, normale e alto.

I range qui riportati sono simili a quelli indicati da Cavanagh e Rodgers, che come primo e terzo quartile hanno indicato 0,21 e 0,26, dimostrando forse che tali valori rimangono invariati tra le popolazioni. Stando ai dati qui riportati 12 partecipanti sono classificati con un piede ad arco alto, 24 normale e 12 con arco basso. Viene poi svolta un'analisi per determinare se vi sia una qualche differenza evidente tra i vari tipi di piede. Il risultato mostra che non vi sono differenze significative per quanto

riguarda età, statura, peso, indice di massa, stima del grasso corporeo, lunghezza del piede, larghezza del piede e altezza del mesopiede. Sembra allora che, come già riportato in studi precedenti, il peso corporeo e l'indice di massa non siano correlati con l'altezza dell'arco, nonostante Wering e colleghi affermino che un indice di massa corporea alto o un alto contenuto di grassi siano associati ad una persona che ha un arco basso. D'altra parte, l'*indice di lunghezza dell'arco*, il rapporto tra la lunghezza dell'arco e la lunghezza del piede, e l'*altezza navicolare* mostrano un differenza significativa tra i tre gruppi. In termini di dimensioni, ci sono delle differenze consistenti per quanto riguarda la *lunghezza dell'arco*, l'*altezza navicolare* e l'*angolo dorsale del mesopiede* (*mda*) nei tre gruppi. Come ci si può aspettare il gruppo con un arco del piede basso ha una maggior *lunghezza dell'arco* rispetto a quelli con arco normale o alto, di circa 1,09 cm, ma un'*altezza navicolare* più bassa, in media di 0,94 cm, e un'*angolo dorsale del mesopiede* minore, in media di 4,58°. Anche l'*indice dell'arco* dal F-scan, l'*indice dell'impronta*, l'*indice dell'arco modificato*, l'*indice dell'altezza dell'arco*, e il *ranking soggettivo* sono significativamente differenti tra i vari gruppi. L'indice del *malleolo valgo* risulta essere l'unica variabile poco significativa nella classificazione a causa dell'alta varianza nei partecipanti.

L'*angolo dorsale del mesopiede* (α), che è in relazione con l'angolo tra il calcagno e il primo metatarso, sembra essere correlato ai fattori *indice dell'altezza dell'arco* e *altezza navicolare*. Ciò sta ad indicare che l'*angolo dorsale del mesopiede* potrebbe essere utile, collegato ai parametri in relazione con la pressione, tanto quanto le dimensioni relative al navicolare. Tale angolo potrebbe inoltre risultare appropriato per la caratterizzazione dell'arco, in quanto tiene conto anche delle dimensioni del piede. La media del *mda* per i tre tipi è rispettivamente :

Tipo di piede	Arco basso	Arco normale	Arco alto
mda (gradi)	27,08°	24,95°	22,5°

Tabella 4.5. Valori medi dell' angolo dorsale del mesopiede per il piede con arco basso, normale e alto.

Sebbene questi angoli risultino sufficienti per la classificazione devono essere

comparati con l'indice dell'arco, infatti i quartili corrispondenti per mda sono 22,688° e 26,188° che, se utilizzati per la classificazione di arco basso, normale e alto al posto dell'*indice dell'altezza dell'arco*, danno solamente un riscontro del 69% (33 corrispondenze su 48). Sei degli uomini che sono stati classificati in maniera diversa avevano un indice di massa corporea e un contenuto corporeo di grassi alto. Però un simile modello non è stato riscontrato per le donne. L'analisi svolta mostra come mda abbia le più alte correlazioni con tutti gli altri parametri. E' da notare che la misura del mda è notevolmente semplice rispetto al calcolo del AHI. Inoltre una scarsa correlazione per l'indice del malleolo valgo non significa che questo sia poco importante ai fini della classificazione. Tale misura può essere vista come un parametro che caratterizza la funzione dinamica del piede.

4.3.1 Protocollo per classificare un piede normale e piatto usando misure cliniche e radiografiche

Ci sono molti metodi clinici e radiologici per classificare la postura e di conseguenza la tipologia del piede, ciò nonostante non c'è una strategia chiara per selezionare le misure più appropriate. Il metodo qui proposto rappresenta una delle molte soluzioni ancora in ambito sperimentale. Per classificare la tipologia di appartenenza del piede, normale o piatto, sono state scelte come misure di interesse l'*altezza del navicolare* e l'*indice dell'arco*, e come misure radiologiche prese da una lastra laterale e antero-posteriore, l'*angolo tra il talo e il secondo metatarso*, l'*angolo di copertura talo-navicolare*, l'*angolo di inclinazione del calcagno*, e l'*angolo tra il calcagno e il primo metatarso*. Lo scopo era definire il confine tra piede normale e piatto nel range di dati a disposizione.

La procedura prevede il seguente ordine :

- *osservazione visiva;*
- *misurazione dell'altezza navicolare;*
- *misura dell'impronta;*
- *misure angolari dai raggi x (i raggi x sono uno standard accetto per*

testare l'allineamento delle ossa in una posizione di carico statico)

Il primo passo secondo il protocollo è quello di ottenere due misure cliniche relative alla postura (a) *l'indice dell'arco (AI)* e (b) *l'altezza del navicolare normalizzata (troncata)(NNH)*. Queste misure sono calcolate tramite rapporti e hanno una correlazione da moderata a alta con le misure angolari estrapolate dalla tecnica radiografica, che costituiscono una più valida misura dell'allineamento delle ossa che formano lo scheletro. Ciò nonostante l'indice dell'arco e la misura dell'altezza del navicolare normalizzata hanno un'affidabilità del tutto comparabile con le altre misure dell'altezza dell'arco, e sono selezionate per la facilità d'uso e la dimostrata validità. In più l'indice dell'arco dipende dai cambiamenti provocati dall'età nella postura del piede e sono associati a parametri quali massima forza e il picco di pressione nel mesopiede durante la camminata. Un valore alto dell'indice dell'arco indica un piede piatto. Altresì, un valore basso dell'altezza navicolare indica un piede piatto. Per determinare i valori ritenuti normali per l'indice dell'arco e l'altezza del navicolare normalizzata sono stati utilizzati i dati proposti da Scott et al., ottenuti da 50 soggetti sani (26 donne, 24 uomini, di età media 20,9).

Secondo passo : Misure Radiografiche

Le misure ottenute corrispondono ad una posizione di carico bipodale. Queste sono ottenute dalla visione antero-posteriore e laterale di alcune radiografie.

Dalla proiezione A-P risultano le misure di : *angolo tra talo e secondo metatarso (T2MA)*, e *l'angolo di copertura talo-navicolare (TNCA)*. Dalla vista laterale si possono calcolare *l'inclinazione dell'angolo del calcagno (CIA)* e *l'angolo tra il calcagno e il primo metatarso (CIMA)*. L'angolo A decresce nella postura tipica dell'arco piatto; l'angolo B, C e D aumentano con la postura dell'arco piatto, se comparati con la postura dell'arco normale.

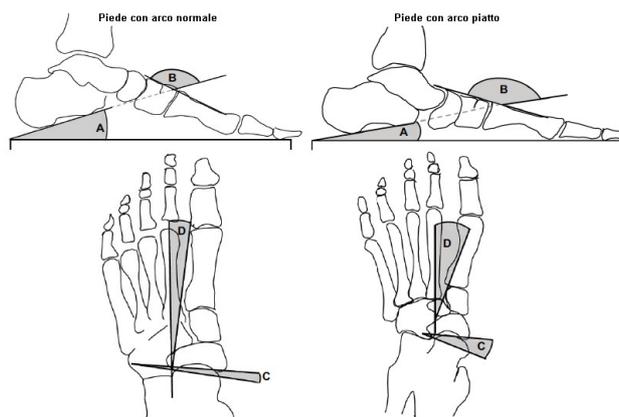


Figura 4.15. Misure radiografiche. Tracce che illustrano le misure angolari derivate dai raggi x per un piede normale (sinistra) e piatto (destra). A – angolo di inclinazione del calcagno, B – angolo calcagno-primo metatarso, C- angolo di copertura talo navicolare, D – angolo talo-secondo metatarso.

I valori di riferimento per l'angolo di inclinazione del calcagno sono stati presi da uno studio svolto da Thomas e colleghi (50 donne e 50 uomini di età media rispettivamente 34,7 e 32,3 anni) che risultano leggermente più anziani di quelli qui presi in considerazione. Come risulta dal primo protocollo (Figura 4.16, pag. 101) l'angolo di copertura talo-navicolare e l'angolo tra calcagno e primo metatarso, presi dalle radiografie iniziali di soggetti con arco normale, sono stati usati per calcolare i valori di riferimento. I pazienti erano ritenuti idonei per lo studio del piede piatto se entrambe le misure dei piani laterale e antero-posteriore eccedevano al più di 1 SD dal valore effettivo della media riportata. La decisione di accettare entrambe le condizioni deriva dall'indecisione su quale fosse la più significativa. L'angolo di copertura talo-navicolare e l'angolo calcagno-secondo metatarso, sono presi dalla radiografia iniziale di un piede normale per calcolare i valori di riferimento al fine di valutare un piede piatto. I partecipanti erano qualificati per la valutazione del piede piatto quando anche solo una misura della visione laterale o antero-posteriore eccedeva di 1 SD dalla media.

Sono di seguito riportate le misure di ciascuna grandezza di interesse per ogni tipo di piede. I dati fanno riferimento ad un protocollo scritto da George S. Murley et al., Journal of Foot and Ankle Research, “A protocol for classifying normal- and flat-

arched foot posture for reasearch studies using clinical and radiographic measurments”, Luglio 2004.

	Tipo di arco		
	Arco piatto n = 31	Arco normale n = 32	Altro n = 28
Caratteristiche generali			
Genere (uomo/donna)	16/15	16/12	17/15
Età media ± SD (anni)	22.0 ± 4.3	23.5 ± 5.7	24.2 ± 6.7
Altezza media ± SD (cm)	171.0 ± 10.0	169.7 ± 9.7	n/a
Peso medio ± SD (Kg)	73.3 ± 15.50	69.9 ± 13.6	n/a
Numero di piedi destri/sinistri	16 destri 15 sinistri	14 destri 18 sinistri	13 destri 15 sinistri
Misure cliniche			
AI media ± SD	0.30 ± 0.07	0.24 ± 0.04	0.23 ± 0.02
NNHt media ± SD	0.18 ± 0.04	0.27 ± 0.03	0.25 ± 0.06
Misure radiografiche			
CIA media ± SD (gradi)	16.1 ± 5.0	20.9 ± 3.4	24.9 ± 4.9
CIMA media ± SD (gradi)	141.7 ± 6.7	132.8 ± 4.0	129.0 ± 7.7
TNCA media ± SD (gradi)	27.5 ± 8.9	12.5 ± 8.6	13.0 ± 6.5
T2MA media ± SD (gradi)	27.5 ± 10.2	13.3 ± 6.3	13.8 ± 5.3

Tabella 4.6. Composizione del campione e misure di interesse. AI - indice dell'arco, NNHt – altezza del navicolare troncata, CIA – angolo di inclinazione del calcagno, CIMA – angolo tra calcagno e primo metatarso, TNCA – angolo di copertura talo-navicolare.

Per lo studio dell'arco normale, i valori clinici e radiografici sono stati presi da altre fonti di pubblicazione precedenti, che descrivevano la postura del piede normale in persone sane e prive di sintomi. Da questi si é poi effettuato un confronto per determinare come un piede piatto possa essere individuato. In particolare, i partecipanti con arco normale risultano avere una media per l'indice dell'arco ($0,24 \pm 0,04$) simile a quella riportata da Cavanagh e Rodgers ($0,23 \pm 0,05$). E' da notare che questo studio ha riportato una media più alta per l'indice dell'arco ($0,24 \pm 0,04$) rispetto a quello svolto da Scott et al. ($0,18 \pm 0,07$), dalla quale é stata derivata la normativa proposta. Tale differenza può essere dovuta alla preventiva selezione del campione.

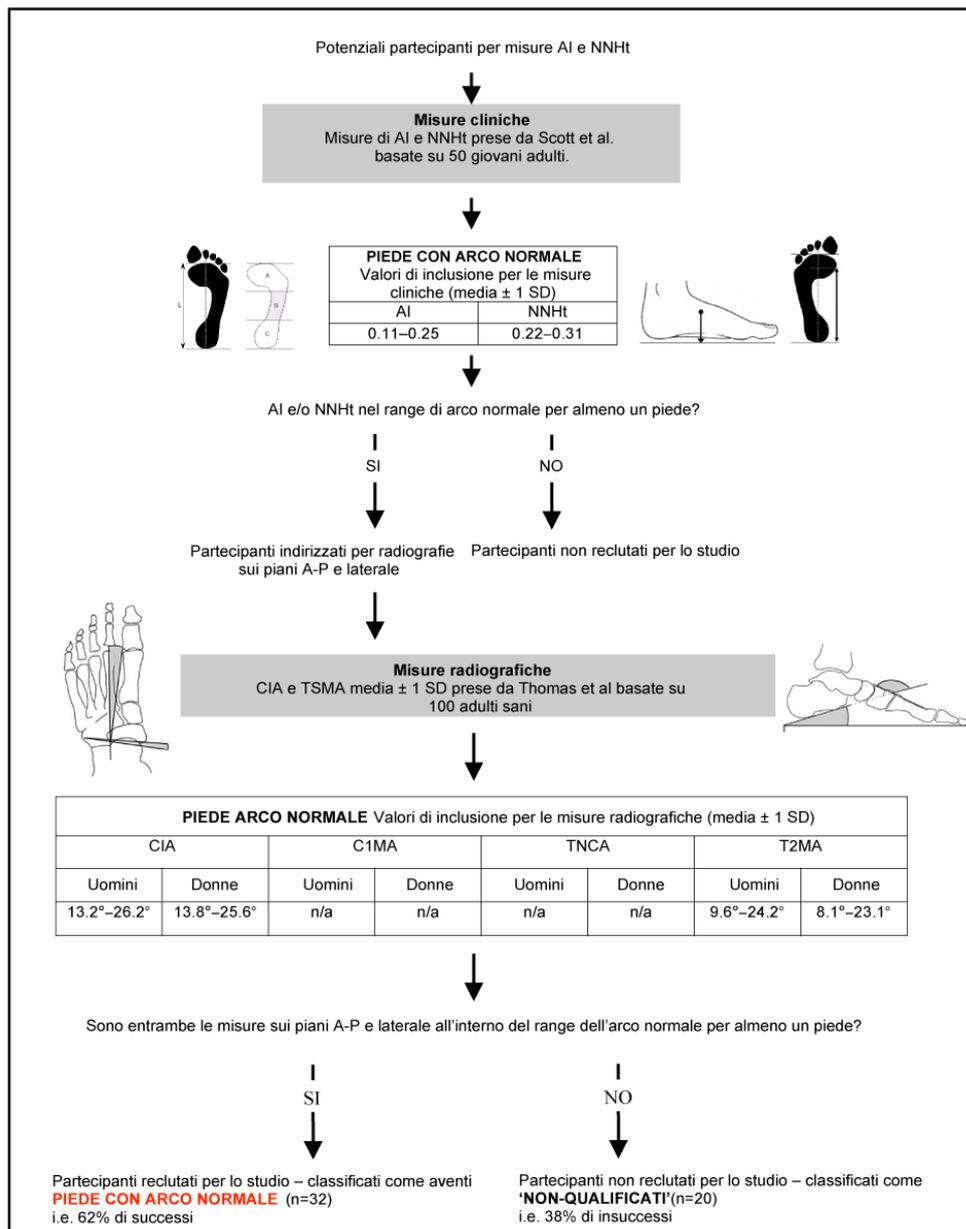


Figura 4.16. Protocollo per valutare la postura del piede ad arco normale. Diagramma a blocchi che mostra come il protocollo sia suddiviso dai dati della normativa. *valori derivati da Scott e colleghi. CIA – angolo di inclinazione calcaneare, C1MA – angolo di inclinazione tra calcagno e primo metatarso, TNCA – angolo di copertura talo-navicolare, T2MA – angolo tra il talo e il secondo metatarso.

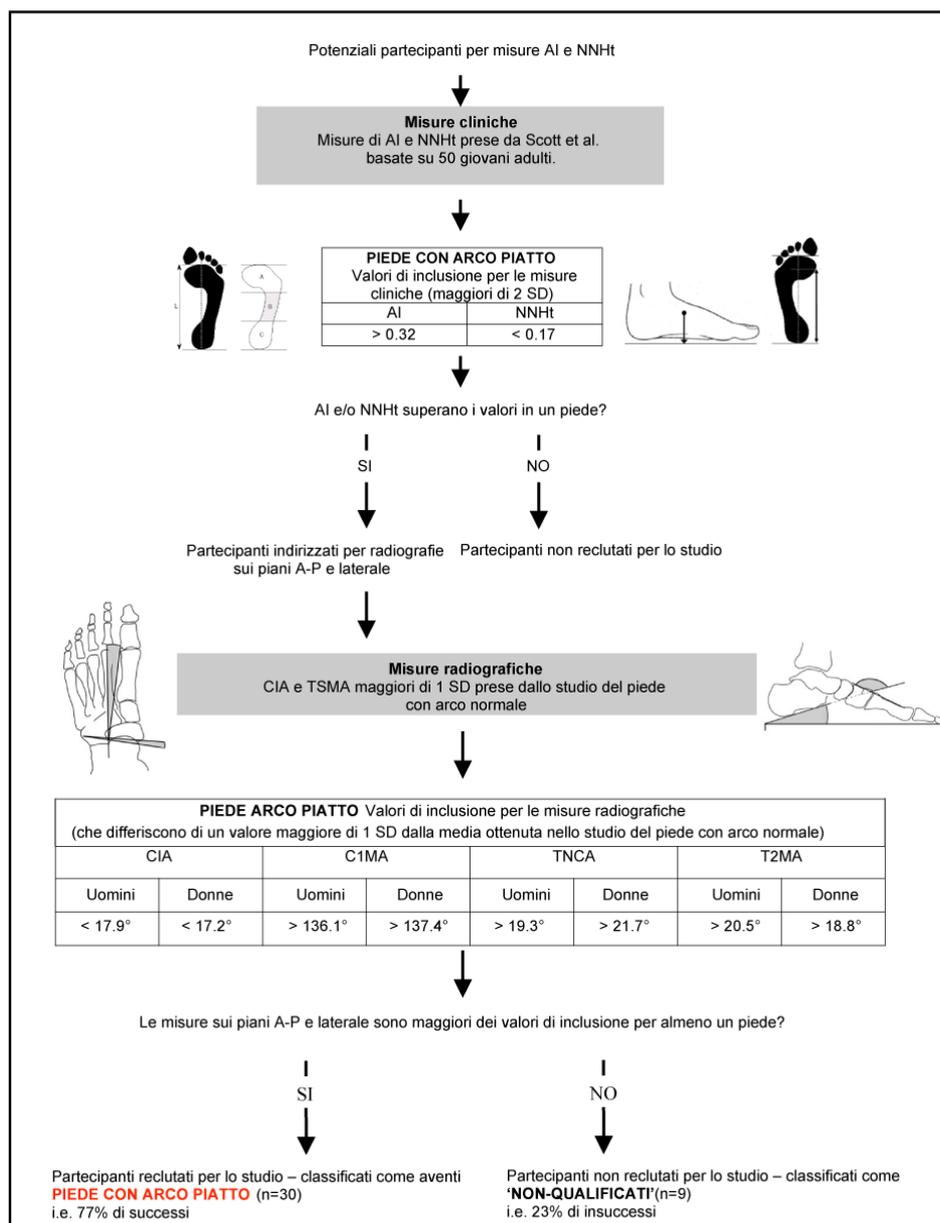


Figura 4.17. Protocollo di screening per la postura del piede piatto. Il diagramma a blocchi mostra come il protocollo per la postura del piede sia derivato dai dati normativi. *Valori derivati da Scott e colleghi. La ragione per cui sono state usate 2 SD (deviazioni standard) era per aumentare la probabilità dei partecipanti con il piede piatto qualificati per inclusione per valutazione radiografica. CIA – angolo di inclinazione calcaneale, CIMA – angolo di inclinazione tra calcagno e primo metatarso, TNCA – angolo di copertura talo-navicolare, T2MA – angolo tra il talo e il secondo metatarso.

Non è facile comparare i valori di indice dell'arco trovati in questo studio ($0,30 \pm 0,07$) con quelli trovati da Cavanagh e Rodgers ($\geq 0,26$) in quanto loro hanno definito "l'arco del piede piatto" giacere al massimo del 25% della distribuzione dei valori dell'indice dell'arco ottenuti da 107 soggetti. Invece è stato qui definito come maggiore di 2 SD dalla media stabilita. Ciò è stato fatto per aumentare la probabilità che più partecipanti con arco piatto fossero inclusi dalla valutazione radiografica. Il valore dell'indice dell'arco che definisce il piede piatto è quindi più severo in questo studio. Sono stati riportati inoltre i valori medi per l'angolo tra *calcagno e metatarso* e per la *copertura talo navicolare* in un piede piatto. Il valore ottenuto per l'*inclinazione del calcagno* e l'*angolo tra talo e secondo metatarso* in piedi normali risultano $1,4^\circ$ e $2,9^\circ$, rispettivamente. Mentre entrambe le misure cliniche sembrano significativamente correlate con tutti gli angoli radiografici, l'IA e NNHt sono più fortemente associate con CI e CIM ottenuti dalla vista laterale. Per questo si è scoperto che IA e NNHt sono misure più sensibili per la valutazione e l'analisi del piede piatto in associazione con gli angoli della vista laterale, che rappresentano meglio l'allineamento sul piano sagittale. Non è chiaro quale dei due piani fornisca un'analisi migliore per la valutazione del piede piatto, ad esempio, la perdita della funzionalità del tendine posteriore della tibia con dolore è associato ad anomalie nei momenti delle giunture in entrambi i piani, sagittale e frontale.

4.4 Valutazione della configurazione interna delle ossa nel piede piatto e cavo

La maggior parte dei piedi possono essere classificati basandosi sull'altezza dell'arco e sull'allineamento dell'avampiede e del retro piede in tre principali categorie : piede cavo (arco alto), piede allineato naturalmente e piede piatto (arco basso). Inoltre, vari tipi di indici sono stati definiti al fine di quantificare la relazione esistente tra l'impronta del piede e l'altezza dell'arco stesso. Nonostante queste misure siano facili da usare, la maggior parte coinvolgono aspetti soggettivi (decidere le linee da utilizzare e come posizionarle) e inoltre non forniscono una caratterizzazione

tridimensionale della morfometria specifica delle ossa. Molte ricerche hanno fino ad ora fatto uso della tecnica a raggi x, precedentemente descritta, e di angoli caratteristici, che però sono soggetti a grande variabilità tra le misure. Sono stati usati anche vari tipi di scanner, ma l'incostanza delle condizioni di misura, come per esempio il carico usato per ottenere una condizione standard, costituiscono un ostacolo non trascurabile al fine di eseguire confronti significativi e di proporre un modello univoco. È infatti importante esaminare il piede in condizioni di carico fisiologico, in quanto è in tale situazione che il piede è chiamato a svolgere le sue principali funzioni. Ad esempio nel caso del piede piatto, questo può apparire quasi normale in condizioni di scarico, ma collassare una volta caricato, sotto il peso corporeo. Le caratteristiche che descrivono il piede piatto e cavo sono in generale definite e accettate, anche se manca uno sviluppo di un modello 3D che ne riassume le caratteristiche.

Lo scopo dello studio qui preso in considerazione è definire un modello 3D che descriva la forma che assume il piede in condizione di carico fisiologico, e quindi esaminare come queste cambino nel caso delle due patologie del piede piatto e piede cavo. Tale modello dovrebbe inoltre facilitare le valutazioni pre-operatorie, necessarie ai vari tipi di interventi. Come già definito in precedenza, vi sono 8 coppie di ossa prese in considerazione, a ciascuna coppia sono associati i rispettivi angoli di Cardano. Senza ripetere la trattazione vista per un piede non patologico continuiamo il discorso svolgendo un'analisi della caratterizzazione interna nel caso di piede cavo e piatto. Comparando la morfometria dei tre tipi di piede, svariati angoli di Cardano risultano differire in modo significativo. Delle otto relazioni prese in considerazione, (M1Tal, M5Tal, CalTal, CalFib, M1M2, CunTal, CunNav, NavTal), sembrano dare risultati analoghi quelle di M5Tal e M1Tal, mentre CalTal e CalFib denotano solo una piccola differenza tra i tipi di piede. Ciò non significa che la posizione del retro piede è ininfluente al fine di determinarne l'appartenenza, nonostante le misure risultanti da questo studio non dipendano in modo evidente dal retro piede. Qualitativamente le relazioni tra le ossa differiscono tra i tre tipi di piede in ciascun piano cartesiano, e ciò è di facile dimostrazione se si prende in considerazione la relazione che c'è tra il primo metatarso e il talo. Infatti procedendo nella valutazione dal piede cavo, a

quello allineato normalmente per arrivare a quello piatto, il primo metatarso si muove rispetto al talo da una posizione di inversione ad una di eversione, da una flessione plantare alla dorsale, dall'adduzione all'abduzione. Ciò è facilmente leggibile anche dalla tabella :

	piede cavo	piede normale	piede piatto
Primo metatarso (M1) in relazione al talo (Tal)			
M1TalZ	0,5 ± 4,1	-4,7 ± 3,7	-12,8 ± 3,7
M1TalY'	35,9 ± 3,7	-5,5 ± 3,2	-16,3 ± 3,2
M1TalX''	29,6 ± 2,7	13,1 ± 2,4	3,7 ± 2,4
Angolo Z : +inversione, - eversione; Angolo Y' : + adduzione, - abduzione;			
Angolo X'' : + flessione plantare, - dorsiflessione			

Tabella 4.7. Angoli di Cardano tra cuneiforme e navicolare.

Come specificato nella didascalia, la misura dell'angolo M1TalZ si riferisce al grado di inversione (+) ed eversione (-). Scorrendo la prima riga si nota il passaggio da uno stato di inversione (tipico del piede cavo) ad uno stato di eversione (tipico del piede piatto). Così come per la seconda riga che evidenzia il passaggio dall'adduzione all'abduzione e la terza, relativa all'angolo M1TalX'' denota il passaggio dalla flessione plantare a quella dorsale. Tale differenza di conformazione è ancora più intuitiva se messa in relazione alle immagini tridimensionali delle ossa nei piani frontale, sagittale e trasversale, rispettivamente, appartenenti a ciascun tipo di patologia presa in considerazione. Nella prima colonna sono rappresentate le tre configurazioni tramite una visione anteriore del piano frontale, questa mette in evidenza i movimenti relativi all'asse Z, e quindi come si passi da inversione all'eversione procedendo dalla valutazione del piede cavo a quello piatto. Nella seconda colonna è rappresentata una visione mediale del piano sagittale, utile per valutare i movimenti di flessione plantare e dorsale, relativi allo spostamento dell'asse X. Nella terza colonna è invece evidente il passaggio da adduzione ad abduzione, grazie alla visione superiore del piano trasversale, che mette quindi in evidenza la rotazione dell'asse Y.

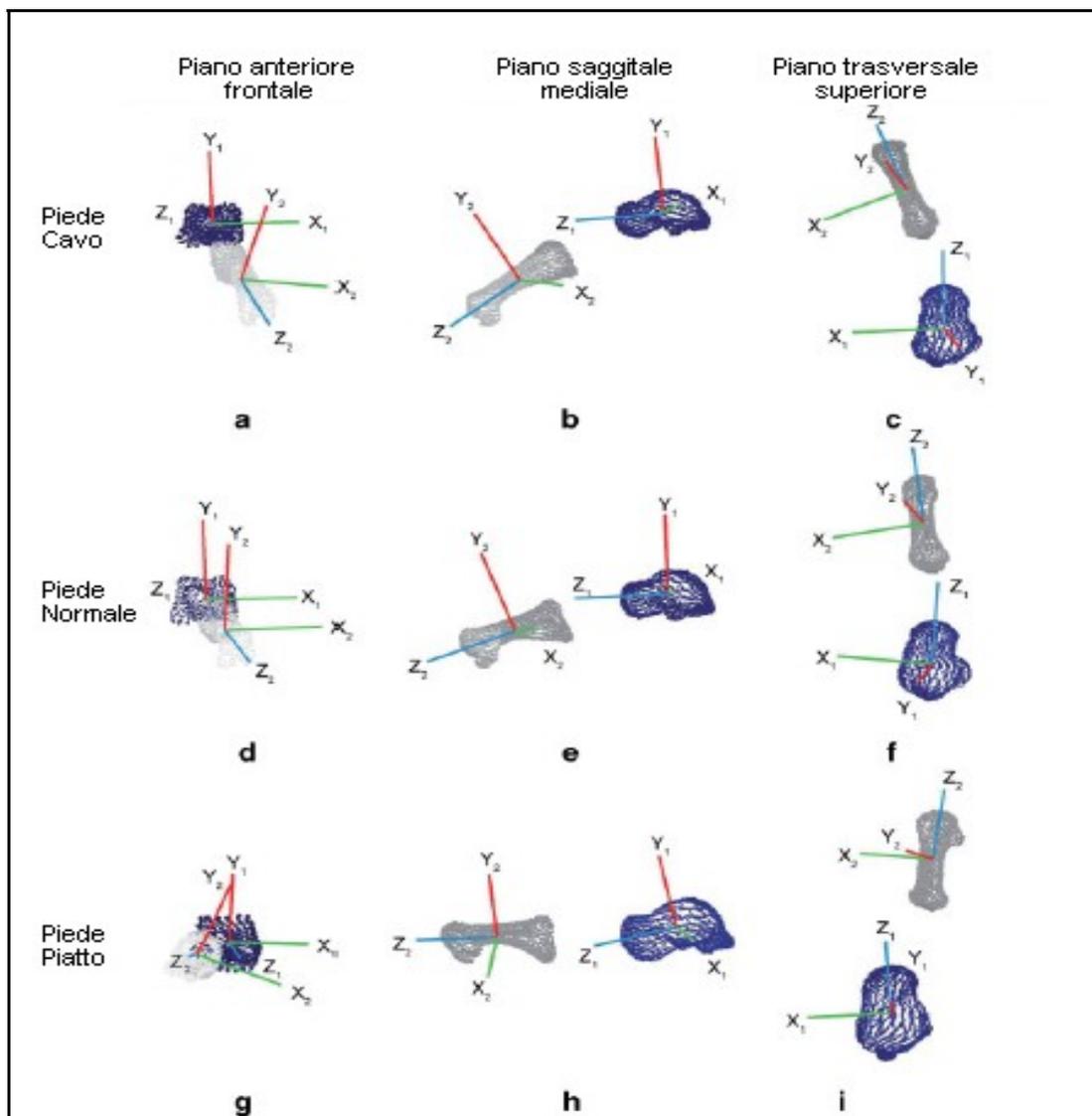


Figura 4.18. Relazione tra primo metatarso e talo nel piede destro. (a), (d) e (g) sono visioni anteriori del piano frontale; (b), (e) e (h) sono viste mediali del piano saggittale; (c), (f) e (i) sono viste superiori del piano trasversale. (a), (b) e (c) si riferiscono al piede cavo; (d), (e) e (f) al piede con allineamento naturale; (g), (h) e (i) al piede piatto.

Le relazioni tra il primo e il secondo metatarso, come già sottolineato, presentano differenze in tutti e tre i piani, in particolare M2M1Z rappresenta il piano frontale, M2M1Y' rappresenta il piano trasversale e in piccola parte quello frontale e viceversa per M2M1X". Le ultime tre relazioni di interesse sono quelle che coinvolgono il talo, il navicolare e i tre cuneiformi considerati come un corpo unico. Per quanto riguarda

il piano frontale (e quindi l'inversione/ eversione) sono di interesse gli angoli CunTalZ, CunNavX" e NavTalX". Anche gli angoli CunTalX" e NavTalX" rivestono grande importanza ed influenzano però tutti i piani di interesse. In ogni caso si nota come dorsiflessione, inversione e adduzione ricorrono insieme come d'altro canto flessione plantare, eversione e abduzione.

É di seguito proposto uno schema generale per la classificazione del piede, che prevede 3 confronti al fine di determinare la corretta tipologia, in base alla valutazione di angoli discriminanti sopra trattati.

1. L'angolo CunTalX" è la prima misura selezionata al fine di fornire una classificazione corretta del piede in una delle tre categorie, piede cavo, normale e piatto, in quanto rappresenta una trasformazione triplanare (dorsiflessione/ inversione/ adduzione o flessione plantare/ eversione/ abduzione) dell'osso cuneiforme relativamente al talo. Se CunTalX" $< 23,55^\circ$ rappresenta un *piede cavo*.
2. La misura primaria per separare un piede con allineamento normale da un piede piatto è l'angolo M1TalX" che rappresenta la flessione del primo metatarso rispetto al secondo. Se la flessione plantare M1TalX" $< 4,92^\circ$ il piede è classificato come piatto, avendo il piede normale una flessione plantare più accentuata.
3. La misura angolare che infine discrimina la differenza tra piede allineato naturalmente e piatto è l'angolo CunNavX" che rappresenta la componente del piano frontale. Se il piede ha un'inversione CunNavX" $< 32,1^\circ$ è un piede con allineamento naturale. Se l'osso cuneiforme presenta un'inversione maggiore è classificato come piano.

L'utilizzo di questo metodo fornisce un errore pari al 14%. Questo risultato può essere comparato con altri studi che hanno classificato i tipi di piede. Rappresentativamente valori dell'indice dell'arco quali 0,07 per l'arco alto, 0,24 per l'arco normale e 0,36 per l'arco piatto sembrano dimostrare un continuo. Questi gruppi corrispondono con i sopra citati piede cavo, allineato naturalmente e piede piano. Inoltre anche molte delle variabili qui citate (es. tutti gli angoli di Cardano tra il primo metatarso e il talo) rappresentano anch'esse un continuo tra piede cavo,

naturale e piatto. Un confronto diretto con i dati ottenuti da analisi tramite raggi X risulta difficoltoso in quanto manca un sistema di coordinate anatomiche al quale ricondurre le misure ottenute. L'angolo laterale talo-metatarsale è stato usato per definire le relazioni del piano sagittale tra l'asse lungo del primo metatarso e il talo. Il piede naturale era compreso tra $+4^\circ$ e -4° , con angoli largamente positivi per il piede cavo e largamente negativi per il piede piatto. Questi range sono differenti per l'angolo M1TIX", che è primariamente una descrizione del piano sagittale, che è $29,6^\circ$ per il piede cavo, $13,1^\circ$ per quello naturale e $3,7^\circ$ o $-0,5^\circ$. I segni confermano che il piede cavo è associato ad angoli più positivi degli altri tipi, e c'è un continuo tra le tre tipologie, ma ciò nonostante la posizione naturale proposta da questo metodo non è 0° . Anche l'angolo M2M1Y rappresenta il piano trasverso (abduzione e adduzione), ma nonostante ciò quando la trasformazione risulta più complessa e tridimensionale un confronto è reso impossibile. Tale dato è migliorabile aumentando il numero di soggetti su cui eseguire le misure e valutare i parametri. I dati sopra esposti si riferiscono ad un campione di 65 soggetti, dei quali 64 sono stati correttamente classificati.

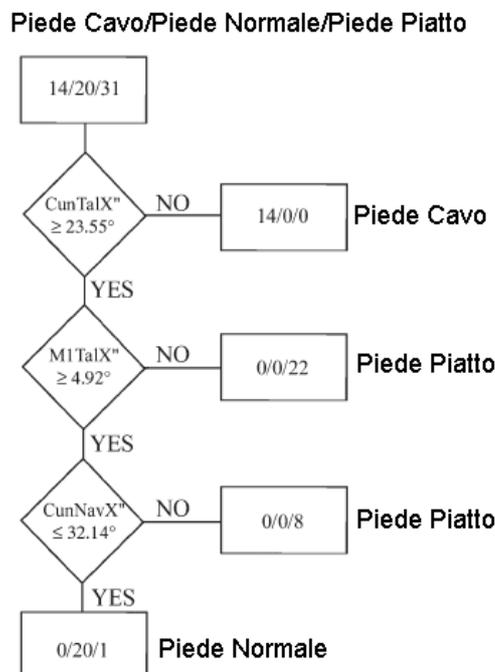


Figura 4.19. Classificazione che deriva dal criterio di analisi tridimensionale.

	Piede Cavo	Piede Normale	Piede Piatto Asintomatico	Piede Piatto Sintomatico
Primo metatarso (M1) in relazione al talo (Tal)				
M1TalZ [°]	0.5 ± 4.1	-4.7 ± 3.7	-12.8 ± 3.7	-13.7 ± 4.0
M1TalY [°]	35.9 ± 3.7	-5.5 ± 3.2	-16.3 ± 3.2	-21.3 ± 3.6
M1TalX [°]	29.6 ± 2.7	13.1 ± 2.4	3.7 ± 2.4	-0.5 ± 2.7
Secondo metatarso (M2) in relazione al primo metatarso (M1)				
M2M1Z	50.5 ± 3.3	28.4 ± 2.9	29.0 ± 2.9	34.5 ± 3.3
M2M1Y [°]	-4.4 ± 1.0	-8.6 ± 0.9	-10.2 ± 0.9	-11.5 ± 1.0
M2M1X [°]	-4.2 ± 0.8	0.1 ± 0.8	0.2 ± 0.7	2.3 ± 0.8
Cuneiforme (Cun) in relazione al talo (Tal)				
CunTalZ [°]	18.4 ± 5.2	-41.1 ± 4.7	-58.1 ± 4.7	-61.9 ± 5.0
CunTalY [°]	-33.5 ± 2.8	-36.4 ± 2.5	-38.1 ± 2.5	-36.6 ± 2.8
CunTalX [°]	-8.7 ± 4.6	49.8 ± 4.1	70.8 ± 4.1	69.8 ± 4.5
Cuneiforme (Cun) in relazione alla navicolare (Nav)				
CunNavZ	-31.7 ± 3.0	-27.6 ± 2.7	-20.7 ± 2.7	-18.3 ± 2.9
CunNavY [°]	-4.2 ± 1.1	-7.8 ± 1.0	-7.1 ± 1.0	-9.9 ± 1.1
CunNavX [°]	13.1 ± 2.1	24.4 ± 1.9	34.8 ± 1.9	30.8 ± 2.1
Navicolare (Nav) in relazione al talo (Tal)				
NavTalZ [°]	43.7 ± 7.4	-52.3 ± 6.5	-68.6 ± 6.5	-70.0 ± 7.3
NavTalY [°]	-56.4 ± 2.8	-63.0 ± 2.4	-58.7 ± 2.4	-56.6 ± 2.7
NavTalX [°]	-39.8 ± 6.3	35.9 ± 5.6	49.1 ± 5.5	47.0 ± 6.2

Tabella 4.8. Relazioni angolari per i differenti segmenti ossei presi in considerazione in relazione ai tre tipi di piede.

4.5 Valutazione delle distribuzioni pressorie in base alla tipologia del piede

Le variazioni della forma del piede, dovute alle varie patologie, provocano, oltre alla modificazione della morfometria e della struttura, anche un cambiamento nella distribuzione pressoria. Lo scanner F-scan, già richiamato in precedenza come tecnica di valutazione degli indici, è utile per determinare l'area di contatto, la distribuzione delle forze e i picchi di pressione. La configurazione dell'arco è collegata con la distribuzione pressoria tramite due parametri: l'*indice dell'arco* (ottenuto tramite F-scan) e l'*indice dell'arco modificato*. Si vogliono allora considerare come variano la *superficie di contatto*, i *picchi di pressione* e l'*integrale della pressione nel tempo* nel caso di piede cavo, normale e piatto. In tale analisi la patologia del piede cavo è suddivisa in base alle sue due cause principali in idiopatica

e neurologica. Per quanto riguarda le cause neurologiche il 50% è attribuito alla malattia di Charcot-Marie-Tooth. Al fine di valutare in modo opportuno i parametri di interesse, sono stati utilizzati nei vari studi strumenti di misura quali: baropodometri, podogrammi, immagini a raggi x, piattaforme EMED-SF e il sistema Pedar X. Tali strumenti sono stati utilizzati per le misure sull'intero piede, sull'avampiede, sul mesopiede e sul retropiede. Inoltre i dati sono stati reperiti da tre differenti studi e campioni di popolazione, distribuiti come segue :

- il primo gruppo di dati provengono da uno studio di Burns e Crosbie sul piede cavo idiologico e neurologico;
- il secondo gruppo di dati provengono da uno studio di Gravante e Pomara sul piede normale e cavo;
- il terzo gruppo di dati provengono da uno studio di Nunley e Mall su pazienti con piede normale e piatto, durante la camminata.

La distribuzione del campione, l'età, l'altezza, il peso, l'indice di massa corporea sono riassunti in tabella 4.9.

Tipo di Piede	Età (anni)	Altezza	Peso (kg)	BMI (kg/m²)	Numero
1° gruppo					
cavo idiopatico	30,6 ± 13,5	/	/	25,4 ± 5,3	30
cavo neurologico	56,5 ± 18,6	/	/	25,9 ± 1,9	10
normale	31,7 ± 11,1	/	/	24,3 ± 3,6	30
2° gruppo donne					
cavo	22.59 ± 4.12	159,10 ± 7,25 cm	55.88 ± 8.83	22.07 ± 3.06	17
normale	22.00 ± 3.15	160.32 ± 6.58 cm	55.79 ± 7.09	21.62 ± 1.48	29
piatto	/	/	/	/	
2° gruppo uomini					
cavo	25.00 ± 5.94	175.45 ± 5.54 cm	68.15 ± 6.56	22.12 ± 1.66	10
normale	24.25 ± 5.05	176.45 ± 7.85 cm	69.84 ± 9.33	22.36 ± 1.88	16
piatto	/	/	/	/	
3° gruppo					
cavo	25,2 ± 3,3	1,77 ± 0,08 m	74,8 ± 13,2	/	/
normale	24,7 ± 4,3	1,77 ± 0,09 m	81,5 ± 17,5	/	34
piatto	/	/	/	/	16

Tabella 4.9. Distribuzione del campione nei tre gruppi.

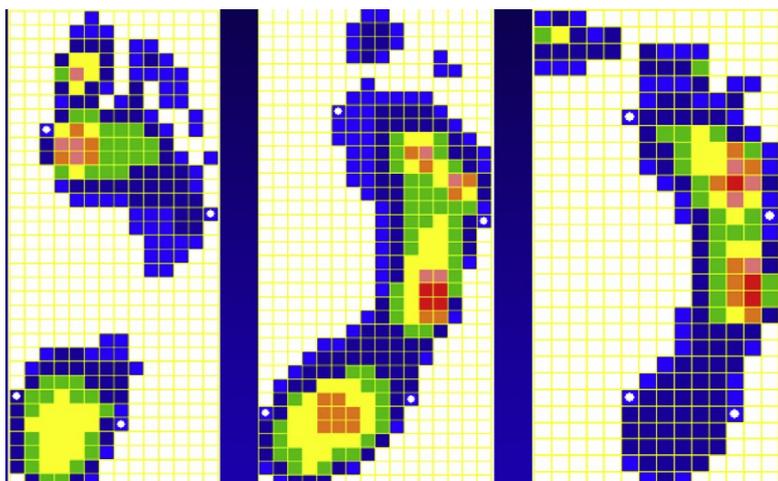


Figura 4.20. Dati sulla pressione in differenti tipi di piede cavo. In azzurro è indicata una bassa pressione, mentre le aree rosse sono quelle ad alta pressione. Il piede a sinistra è un piede con avampiede cavo. Il primo raggio è iperplantarflexo con il risultato di un'alta pressione sotto la testa del primo metatarso e una pressione minore sotto il quarto e il quinto metatarso. La figura mediana mostra un piede con pronunciata rotazione della parte posteriore e rotazione mediale, che risulta in un incremento della pressione sotto il tallone e nel bordo laterale del piede. Il piede a destra è così grave che solamente il bordo laterale è significativamente caricato.

Preventivamente si è svolta un'analisi e una classificazione dei soggetti all'interno delle tre tipologie, piede cavo, piatto normale, e nel caso del piede piatto si è valutato se fosse di origine idiopatica o neurologica. Per determinare l'appartenenza ai gruppi dei soggetti considerati si è fatto uso dell'indice *posturale del piede*, che per un valore minore o uguale a -2 rappresenta un piede cavo, se compreso tra 2 e 8 un piede normale, maggiore di 8 un piede piatto. Tale indice si avvale di un punteggio che deriva da otto misure morfometriche ricavate in condizione di carico.

E' largamente accettata l'idea che il piede cavo abbia una superficie di contatto ridotta, sia più rigido ed di conseguenza assorba meno gli urti. Questa riduzione della superficie di contatto è dovuta alla riduzione dell'area dell'avampiede e del retropiede in entrambe le impronte plantari. All'eziologia neurologica è associata una maggiore debolezza muscolare degli arti inferiori, presumibilmente legata ad una deformità

cava più pronunciata, e una distribuzione pressoria con valori superiori.

Il piede è stato diviso in tre regioni, tramite una maschera percentuale. Per ciascuna regione i parametri di pressione considerati sono: la superficie di contatto, i picchi di pressione e l'integrale nel tempo della pressione.

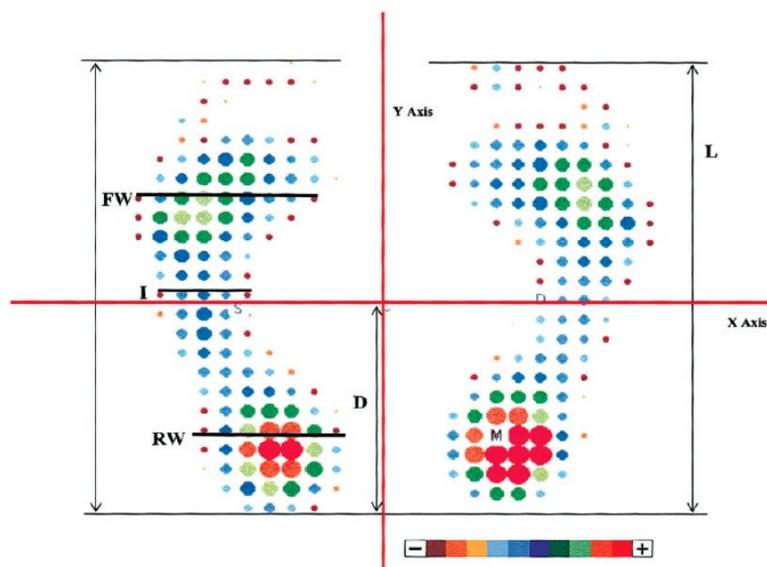


Figura 4.21. Misure geometriche dell'impronta plantare ottenute tramite una piattaforma per le forze. Il vettore delle forze è rappresentato in percentuale rispetto al picco di pressione M con differenti misure e colori, in accordo con la scala cromatica.

Per valutare la distribuzione pressoria sono fondamentali delle osservazioni su come varia l'area di contatto del piede con il suolo, a tale scopo si fa uso dei seguenti indici :

- D = la distanza ortogonale del centro piede dalla linea dietro al calcagno;
- FW = la larghezza massima dell'avampiede;
- I = la minor larghezza del mesopiede;
- RW = la larghezza massima del retropiede (calcagno posteriore);
- L = massima lunghezza dell'impronta;
- M = picco massimo di pressione;

Per valutare l'area di contatto del mesopiede con il terreno si usa il rapporto I/FW , se questo rapporto è uguale a 0 per tutte e due le impronte indica un piede cavo bilaterale. Se il rapporto è compreso tra 0,33 e 0,66 indica un piede normale, mentre

se è maggiore di 0,66 indica un piede piatto.

Come suggerito dalla tabella 4.10, la **superficie di contatto** del mesopiede risulta ridotta nel piede cavo idiopatico, rispetto a quello normale; infatti si passa da un valore di 14,6 (6,3) cm² per il piede normale a 8,8 (8,0) cm² per il piede idiopatico. Non si riscontrano altre differenze significative per quanto riguarda l'area di contatto tra i tre gruppi (idiopatico, neurologico e normale). Per quanto riguarda il piede cavo possiamo notare una differenza significativa nella regione mediale del mesopiede, che sembra aumentare coerentemente con il diminuire della cavità.

	Area di contatto (NICA)	
	Arco normale	Arco basso
Retro piede	0.242 ± 0.004	0.248 ± 0.005
Mesopiede mediale	0.108 ± 0.005	0.130 ± 0.007*
Mesopiede laterale	0.152 ± 0.001	0.152 ± 0.002
Avampiede mediale	0.075 ± 0.001	0.075 ± 0.001
Avampiede mediano	0.087 ± 0.001	0.086 ± 0.001
Avampiede laterale	0.083 ± 0.001	0.082 ± 0.001
Alluce	0.064 ± 0.001	0.064 ± 0.001
Dito minore	0.106 ± 0.001	0.110 ± 0.002

Tabella 4.10. Area di contatto normalizzata con l'area di contatto dell'intero piede (NICA).

Regioni del piede	Piede normale	Piede cavo idiopatico	Piede cavo neurologico
Piede intero	125.8 (22.0)	116.9 (20.4)	112.2 (19.6)
Retropiede	37.7 (6.4)	37.9 (5.5)	36.6 (6.0)
Mesopiede	14.6 (6.3)	8.8 (8.0)*	12.4 (5.5)
Avampiede	74.3 (11.7)	70.7 (10.1)	63.9 (11.6)

Tabella 4.11. Area di contatto espressa in (cm²). Dati caratteristici per il piede normale, cavo (idiopatico e neurologico) e piatto.

I **picchi di pressione** differiscono tra i tre gruppi (normale, idiopatico e neurologico) soprattutto per quanto riguarda la regione del retropiede e del mesopiede. I picchi di pressione del retropiede sono più alti nel piede cavo idiopatico rispetto a quello normale e anche rispetto al piede cavo neurologico. Si può notare anche un significativo decrescere dei picchi di pressione nell'avampiede laterale per quanto riguarda il piede piatto se comparato con un piede normale, anche se in generale i carichi nell'avampiede non risultano essere significativamente differenti tra i tre gruppi e nemmeno in relazione al piede cavo. Nel gruppo con l'arco alto, il retropiede

ha il 17% in più di carico e il mesopiede l'11% in meno che nel gruppo che presenta l'arco basso. Queste differenze fanno sì che nel gruppo con l'arco alto si abbia un picco di pressione minore nella regione del mesopiede e un picco di pressione maggiore nella regione del retro piede rispetto al gruppo con l'arco basso. La media (SD) dei picchi pressori nel retro piede è di 112,6 (27,51) kPa per il piede con l'arco alto, 101,57 (22,47) kPa in piedi con arco normale, e 91,14 (24,19) kPa in piedi con arco basso.

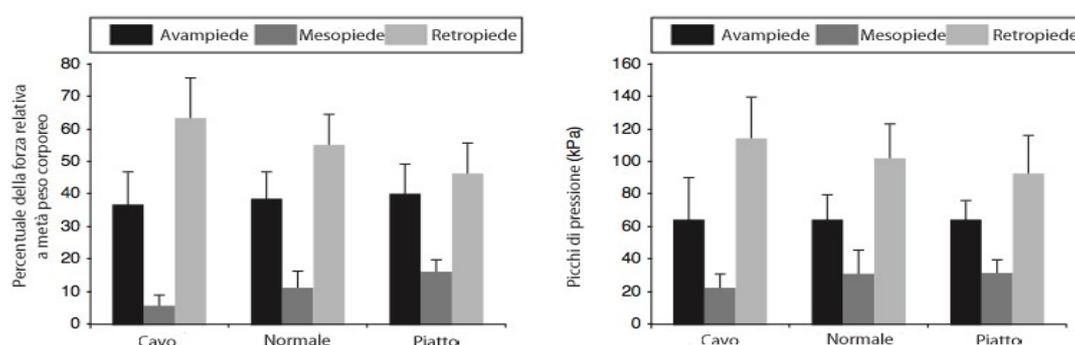


Figura 4.22. Distribuzione delle forze medie relative a metà del peso corporeo nelle tre regioni di ciascun piede (piatto, normale e cavo). A destra picchi medi di pressione nei differenti tipi di piede (piatto, normale e cavo)

Witana e colleghi sostengono che una calzata confortevole debba sostenere un picco di pressione minore 100 kPa. È chiaro che le persone con arco alto necessitano di un supporto addizionale per ridurre gli alti picchi di pressione. Una limitazione di questo studio è che le misure sono state valutate nei pazienti in posizione eretta. I parametri potrebbero cambiare durante la camminata e potrebbe non essere facile determinare gli stessi parametri in condizione dinamica, anche se altri studi riportano come i tre parametri qui considerati subiscano un'incremento durante la corsa.

L'**integrale della pressione** nel tempo è calcolato come la somma di picchi di pressione di ciascun immagine del contatto del piede, moltiplicato per la durata del contatto. Nel piede cavo idiopatico risultano essere più alte rispetto al piede normale, per quanto riguarda l'intero piede, il retro piede e l'avampiede. Sono più alti anche nel piede cavo neurologico rispetto al piede normale per l'intero piede, il mesopiede ed il retro piede.

	Picchi di pressione (kPa)	
	Arco normale	Arco basso
Retto piede	230.5 ± 9.9	239.9 ± 14.4
Mesopiede mediale	134.4 ± 5.3	135.4 ± 7.8
Mesopiede laterale	154.9 ± 4.9	147.8 ± 7.2
Avampiede mediale	253.0 ± 15.9	254.9 ± 23.2
Avampiede mediano	255.0 ± 11.7	234.1 ± 17.1
Avampiede laterale	221.5 ± 9.6	188.0 ± 14.0 ⁺
Alluce	269.4 ± 13.2	281.1 ± 19.2
Dito minore	223.3 ± 11.7	225.4 ± 17.0

Regioni del piede	Piede normale	Piede cavo idiopatico	Piede cavo neurologico
Piede intero	61.7 (19.9)	70.5 (19.9)	66.1 (28.1)
Retropiede	40.7 (7.5)	45.4 (8.7) [*]	37.4 (9.5) [†]
Mesopiede	9.1 (3.9)	7.8 (5.2)	16.5 (15.4)
Avampiede	60.8 (20.6)	69.8 (20.8)	64.5 (29.1)

Tabella 4.12 e 4.13. Picchi di pressione espressi in (N/m²). Dati caratteristici per il piede normale, cavo (idiopatico e neurologico) e cavo.

In più l'integrale della pressione nel tempo, nel piede cavo neurologico, risulta maggiore rispetto a quello idiopatico per il retropiede ed il mesopiede.

L'integrale della pressione nel tempo, risulta essere maggiore nei soggetti che presentano dolore rispetto a quelli con non presentano dolore. Non vi sono relazioni ritenute di interesse per quanto riguarda il piede piatto e tale integrale. Un elevato valore di integrale di pressione causa dolore per il sovraccarico muscolo-scheletrico e conseguente danno dei tessuti molli.

Regioni del piede	Piede normale	Piede cavo idiopatico	Piede cavo neurologico
Piede intero	23.8 (5.1)	29.7 (7.4) [*]	37.2 (23.7) [*]
Retropiede	8.5 (1.9)	10.4 (2.3) [*]	14.2 (5.7) [*]
Mesopiede	2.3 (1.0)	2.1 (1.7)	6.8 (8.7) [*]
Avampiede	18.4 (5.5)	24.1 (8.0) [*]	31.4 (25.1) [*]

Tabella 4.14. Integrale della pressione nel tempo (N/cm²). Dati caratteristici per il piede normale e cavo idiopatico e neurologico.

Gli studi sulla distribuzione pressoria danno informazioni sul rischio di infortuni e

sulla predisposizione morfologica alla fratture. In letteratura è ambiguo se la presenza del piede piatto sia vantaggiosa o meno nel prevenire fratture metatarsali da tensione o il rischio di tali fratture. La diminuzione dei picchi di pressione nella parte laterale dell'avampiede negli individui con piede piatto potrebbe indicare un decrescere del rischio di incorrere in fratture metatarsali rispetto ad individui con arco normale. Inoltre sembra ci sia una correlazione significativa tra l'aumento del dolore dovuto alla malattia con il procedere della stessa o dell'età e la distribuzione della pressione.

Conclusion

Lo scopo del presente elaborato è ripercorrere da un punto di vista teorico le conoscenze chiave al fine di costruire un modello solido del piede. A tale scopo sono stati presi in considerazione i parametri morfometrici più utili ed utilizzati per la caratterizzazione della forma del piede. Ovviamente i dati riportati non sono oggettivi, ma devono essere contestualizzati in base alla fonte ed in particolare all'autore dal quale sono stati raccolti. Al fine di svolgere un'analisi critica su come questi dati varino in base al genere, all'età e alla provenienza dei soggetti analizzati sono stati eseguiti dei confronti tra campioni diversi. Dal confronto morfometrico risulta che vi sono delle differenze rilevanti per quanto riguarda il genere, l'età e la provenienza in diversi parametri, bisogna però tenere presente che i dati sono fortemente condizionati dalla tecnica e dalle metodologie con le quali sono stati raccolti. Inoltre il confronto tra dati di fonti distinte è reso difficile dalla composizione dei campioni, non sempre omogenea. Attraverso l'analisi della morfometria interna è stato possibile quantificare la forma delle ossa, in particolare è stata analizzata la struttura della caviglia, dell'astragalo, del calcagno e del piede nella sua globalità. Sono stati presi in considerazione anche i rapporti che insistono tra cinque coppie di segmenti ossei differenti e per tale analisi si è fatto uso degli angoli di Cardano. I segmenti ossei e le loro reciproche posizioni danno forma al piede, che è soggetto a continui cambiamenti durante la deambulazione. L'analisi ossea si è quindi soffermata su una struttura di sostegno fondamentale, gli archi plantari, caratterizzati in base agli innumerevoli indici che ad essi sono associati. Quest'analisi è stata poi ripetuta alla luce di due patologie del piede : il piede piatto e cavo. L'idea era analizzare come in queste due patologie cambiasse la morfometria esterna, interna e la struttura funzionale del piede, e in base a questo individuare e

quantificare dei parametri per una classificazione univoca delle tre tipologie del piede. È stata infine rivolta l'attenzione sulla modificazione della distribuzione pressoria nel caso delle due patologie. Questa mette in evidenza come il piede cavo, avendo una superficie di appoggio ridotta, presenti dei picchi di pressione aumentati nel retropiede e al contrario il piede piatto presenti picchi di pressione diminuiti. Un modello così costruito è utile sia in ambito medico nel quale sono sempre più richieste valutazioni diagnostiche con ausili tecnologici, e supporti per interventi chirurgici, sia in ambito ingegneristico, per progredire nel campo della meccanica biologica e della protesica.

Appendice A

Vengono riportati in Appendice A i dettagli relativi agli studi morfometrici del piede riportati in letteratura.

MORFOMETRIA ESTERNA

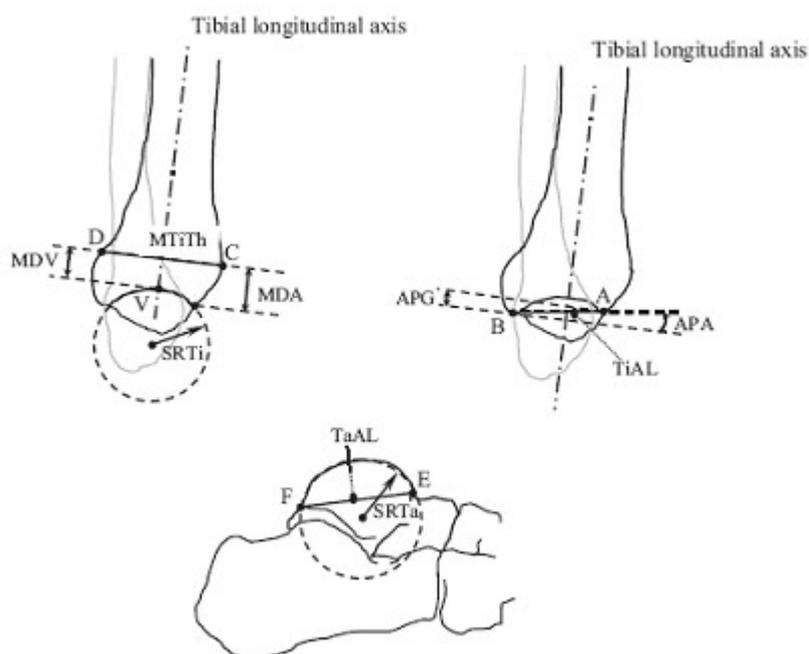
1.1 Dati raccolti su popolazione italiana:.....	2
1.2 Dati raccolti su popolazione europea:.....	6
1.3 Dati raccolti su popolazione americana.....	7
1.3.1 Civili Americani.....	7
1.3.2 Soldati Americani.....	11
1.3.3 Differenti categorie di americani a confronto.....	16
1.4 Dati raccolti su popolazione cinese.....	19

1.1 Dati raccolti su popolazione italiana:

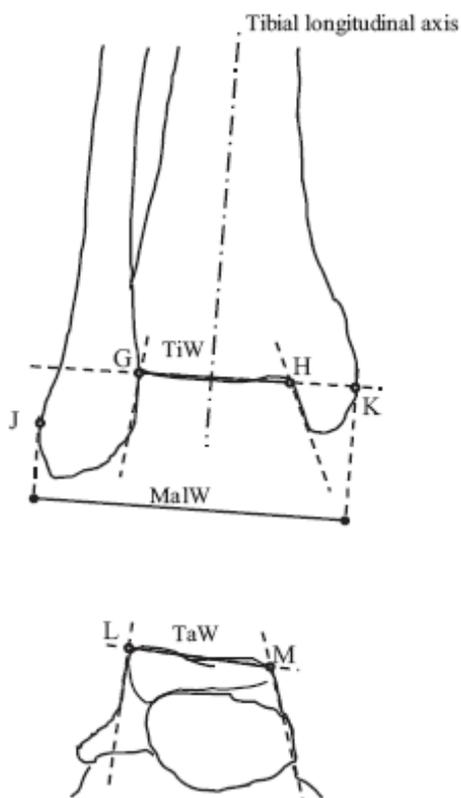
Titolo Articolo: A new semi-automated measurement technique based on X-ray pictures for ankle morphometry

Soggetti: 15 adulti

Le misure riportate in mm fanno riferimento alle seguenti grandezze:



Grandezza	Media	S.D.
TiAL: lunghezza della corda che connette l'estremità anteriore con l'estremità posteriore del mortaio tibiale	33.3	3.5
SRTi: raggio della circonferenza che ha come arco i punti del mortaio tibiale	30.8	8.0
APG: distanza lungo l'asse tibiale longitudinale tra i punti A e B	3.2	2.1
APA: angolo tra il segmento AB e l'asse tibiale antero-posteriore	5.6	3.4
MTiTh: distanza tra il primo punto del profili tibiale anteriore (C) e il punto corrispondente (D) lungo l'asse antero-posteriore	44.4	4.3
MDA: distanza lungo l'asse tibiale longitudinale tra i punti A e C	11.4	2.7
MDV: distanza lungo l'asse longitudinale tibiale tra il vertice del mortaio V, definito come l'intersezione tra l'asse longitudinale della tibia e il profilo del mortaio, e il punto C	8.8	3.0

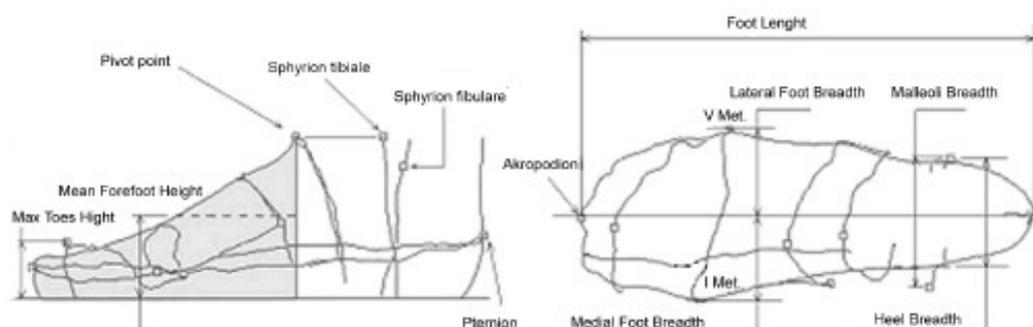


Grandezze	Media	S.D.
TaAL: lunghezza del segmento che connette l'estremo posteriore (F) e l'estremo anteriore (E) dell'arco sagittale della troclea del talo	43.4	3.9
SRTa: raggio della circonferenza che ha come arco i punti della troclea del talo	24.3	4.2
TiW: distanza tra i punti G e H	32.8	5.5
MaIW: distanza lungo l'asse medio laterale tra il punto più esterno del profilo mediale (K) della tibia e il punto più esterno del profilo laterale (J) della fibula	71.2	8.3
TaW: distanza tra L ed M	31.6	2.6

Dati provenienti dall' Università di Torino, Paolo Olivato et al., :
 olivato@psych.unito.it

Soggetti: N=316 (113 uomini, 203 donne) adulti suddivisi tra isole, nord, sud e centro Italia.

L'articolo fa riferimento a diverse grandezze antropometriche che non vengono riportate nel testo.



Vengono date solo alcune informazioni a riguardo:

- Rapporto tra lunghezza e larghezza del piede (L_B)
- Rapporto tra la lunghezza del piede e la larghezza del tallone (_L_Hb)
- Rapporto tra la lunghezza del piede e l'altezza media della parte anteriore del piede (L_Mforeh)
- Rapporto tra la larghezza del piede e l'altezza media della parte anteriore del piede (B_Mforeh)
- Rapporto tra la larghezza laterale (distanza tra V metatarso e asse trasversale) e mediale (distanza tra I metatarso e asse trasversale) del piede (Lat_Med)

Vengono raccolti nelle seguenti tabelle gli unici dati presenti nell'articolo:

Differenze dovute al sesso:

Grandezze	Uomo	Donna
L_Mforeh	2.24	2.30
Lat_med	0.96	1.02

Differenze dovute all'età:

Grandezze	15-20 (N=17)	21-35 (N=117)	36-50 (N=103)	51-70 (N=71)	71-80 (N=5)
L_Hb		3.8410	3.7676	3.6105	
L_Mforeh		6.1394	6.0030	5.8758	

Lat_med		0.9740	0.9898	1.0600	
---------	--	--------	--------	--------	--

Differenze regionali:

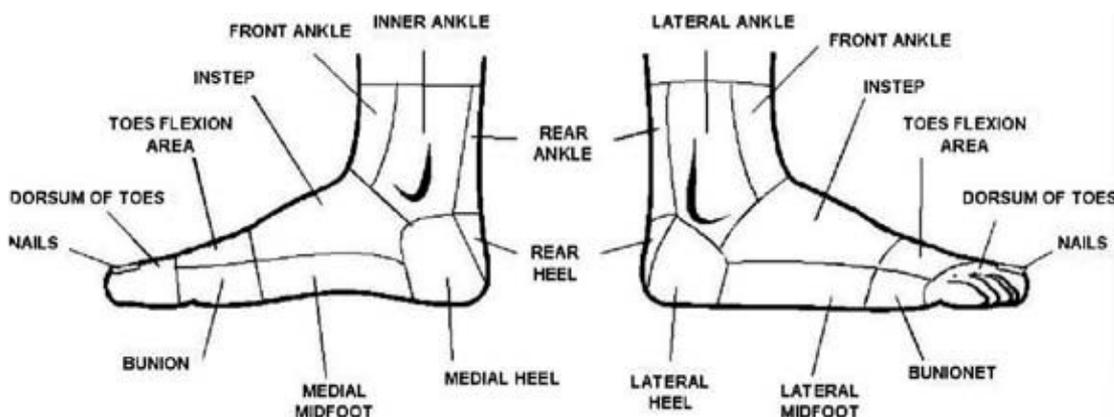
Grandezze	Sud (N=71)	Centro (N=64)	Isole (N=75)	Nord (N=106)
Lunghezza (cm)	24.15		24.51	25.37
Larghezza (cm)	9.06		9.18	9.74
L_B	2.6669	2.6421	2.6746	2.6075
L_Hb	3.9122	3.6629	3.8491	3.6630

1.2 Dati raccolti su popolazione europea:

Titolo Articolo: The MORFO3D foot database

Istituto di Biomeccanica di Valencia: José García Hernández et al.

Soggetti: 316 donne europee, età: 18-35 anni



Grandezze piede destro (cm)	Min	Media	Max
Lunghezza	22.5	24.177	2.576
Larghezza parte anteriore	8.45	9.404	10.64
Spessore caviglia	5.52	6.144	7.05
Altezza del collo del piede	5.18	6.256	8.08
Altezza primo dito	0.76	1.692	2.77
Altezza malleolo esterno	4.99	6.452	12.27

1.3 Dati raccolti su popolazione americana

1.3.1 Civili Americani

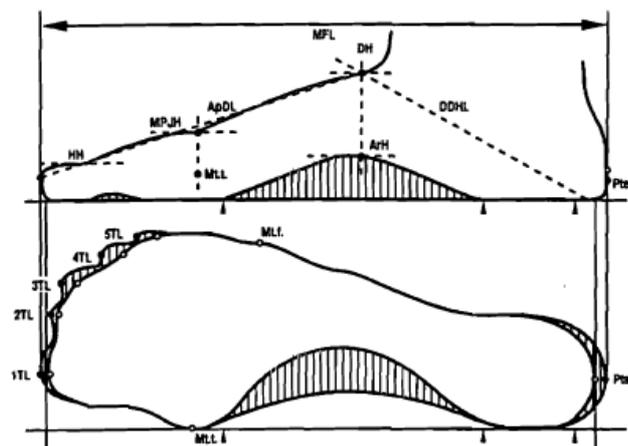
Titolo articolo: Quantitative morphology of the human foot in a north American population

M.R Hawes et al. University of Calgary

Soggetti :1197 civili, età : 18-85

Age group (years)	Subjects		Stature (cm)		Mass (kg)		Max. foot length (cm)	
	N	(%)	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
up to 22-99	130	10-82	178-30	7-46	75-87	10-13	26-42	1-30
23-0-25-99	142	11-88	176-68	6-74	75-63	9-56	26-11	1-21
26-0-28-99	151	12-61	176-83	7-00	75-49	10-20	26-29	1-23
29-0-34-99	265	22-21	176-99	6-45	77-00	10-53	26-45	1-17
35-0-40-99	210	17-58	176-93	5-99	76-95	9-57	26-45	1-20
41-0-46-99	131	10-90	176-16	5-61	79-95	10-52	26-49	1-11
47-0-52-99	58	4-80	177-08	6-37	82-17	13-43	26-54	1-31
53-0 and up	110	9-19	174-18	6-21	79-22	10-34	26-40	1-17
Total (35-47±11-85)	1197	-	176-71	6-54	77-31	10-44	26-32	1-23

Dati antropometrici riportati :



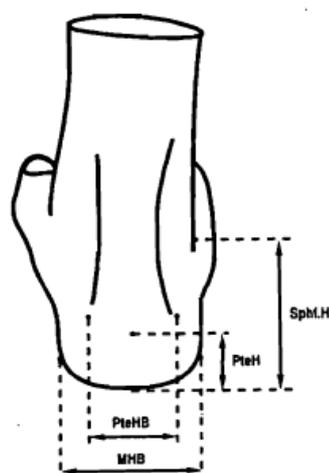
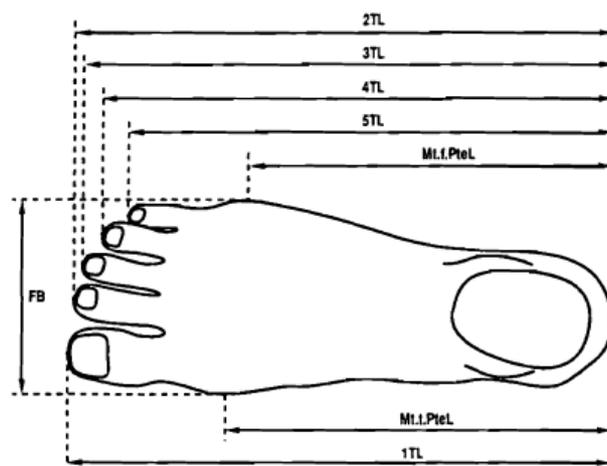


Figure 3. Measurement sites for breadths and heights at the heel.

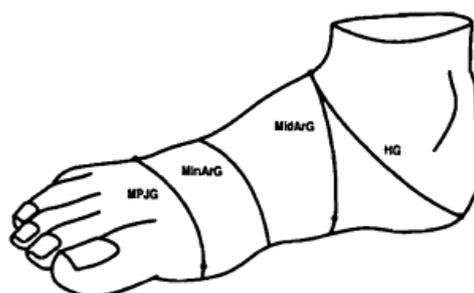


Figure 4. Measurement sites for girths.

	Americani civili		Americani militari		Svedesi militari	
	Hawes et al.		Freedman et al.		Dahlberg et al	
Grandezze	Media	S.D.	Media	S.D.	Media	S.D.
Età	35.47	11.85	22.80		21	
Numero soggetti	1197	0	5575		8232	
Statura	176.71	6.54			175.60	
Massa	77.31	10.44			69.10	

Altezze (cm)						
HH	1.9	0.40	2.74			
MPJH	3.55	0.42	3.88	0.21		
DH	6.53	0.61	7.82	0.49		
Sph f.H	5.98	0.66				
Pte H	2.00	0.47				
Ar H	2.12	0.67	2.83	0.44		
Lunghezze (cm)						
1TL	26.32	1.23	26.84	1.16	26.63	1.25
2TL	26.01	1.22				
3TL	25.05	1.20				
4TL	23.60	1.12				
5TL	21.69	1.05	20.95	0.98		
Mt.f. Pte L	16.90	0.93	15.94	0.90		
Mt.t. Pte L	19.29	0.96	19.26	0.90	19.98	0.95
ApDL	14.73	0.85				
DDHL	13.82	0.79				
Larghezze (cm)						
FB	9.91	0.57	9.80	0.52		
MHB	6.30	0.40	6.96	0.34		
Pte HB	5.43	0.53				
Circonferenze (cm)						
MPJG	25.34	1.30	25.18	1.16	25.62	1.24
Min Ar G	23.43	1.14			24.52	1.16
Mid Ar G	25.38	1.16	25.83	1.14	26.12	1.36
HG	35.89	1.72	4.41	1.55	34.01	1.50

1.3.2 Soldati Americani

**Titolo articolo : Anthropometry of the foot and lower leg of U :S : army soldiers
K. Parham et al.**

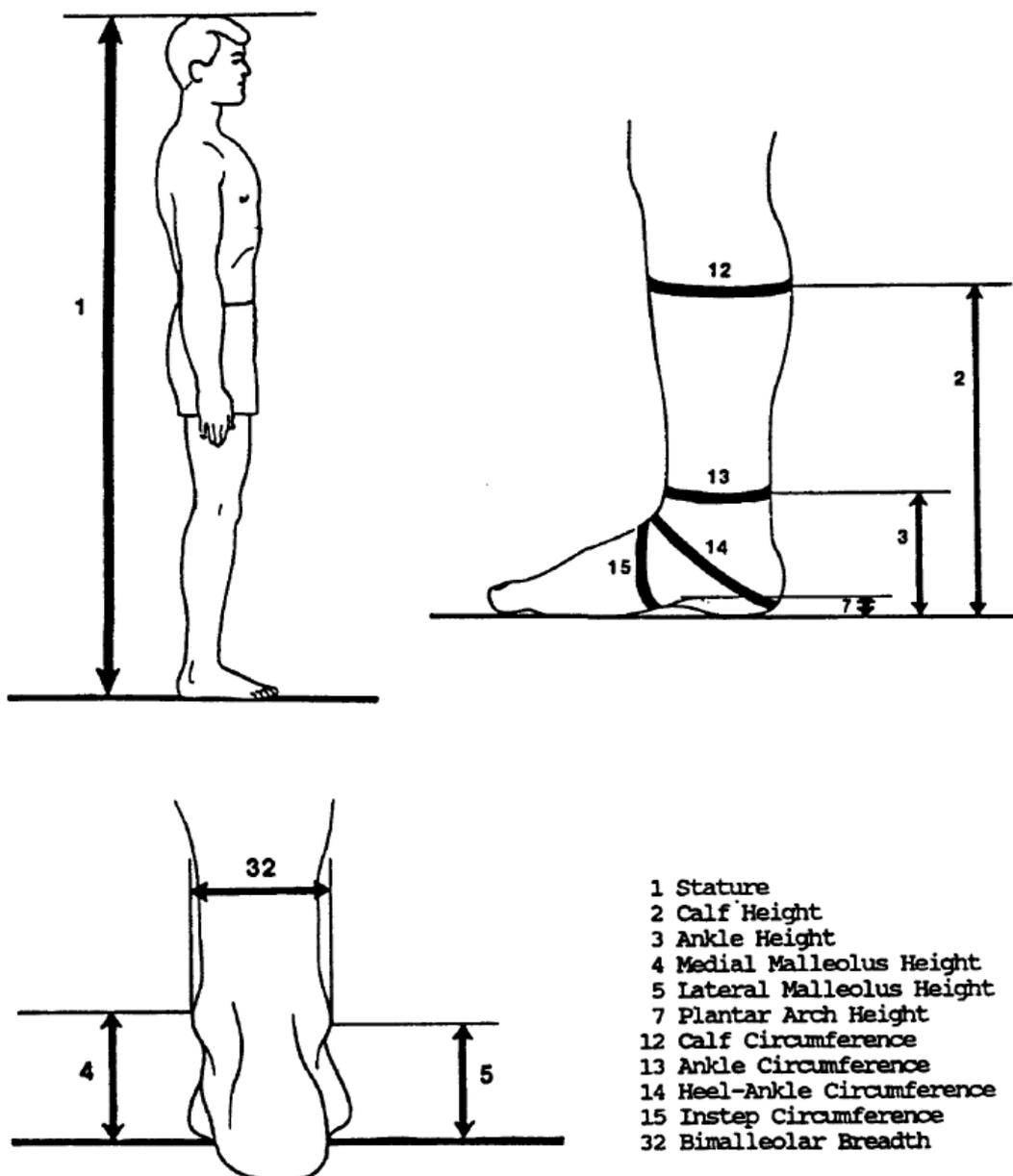
Soggetti: 867 soldati (293 maschi, 491 femmine)

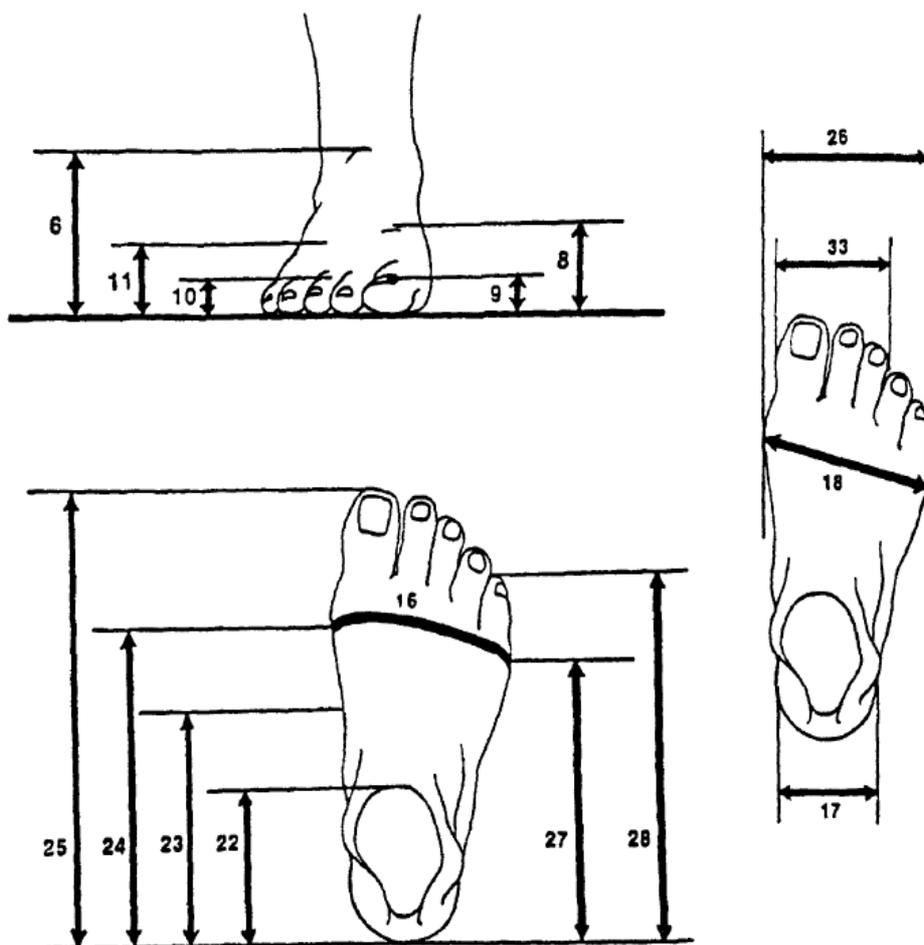
Distribuzione dei soggetti in base all'età e al sesso:

Età	Maschi	Femmine
< 20	182	282
21-24	37	117
25-30	39	61
> 31	35	31
Età media	22.3	21.6

Suddivisione dei soggetti per categorie razziali:

Provenienza	Maschi	Femmine
Bianchi	178	253
Neri	78	194
Ispanici	24	30
Asiatici	9	8
Nativi americani	4	6





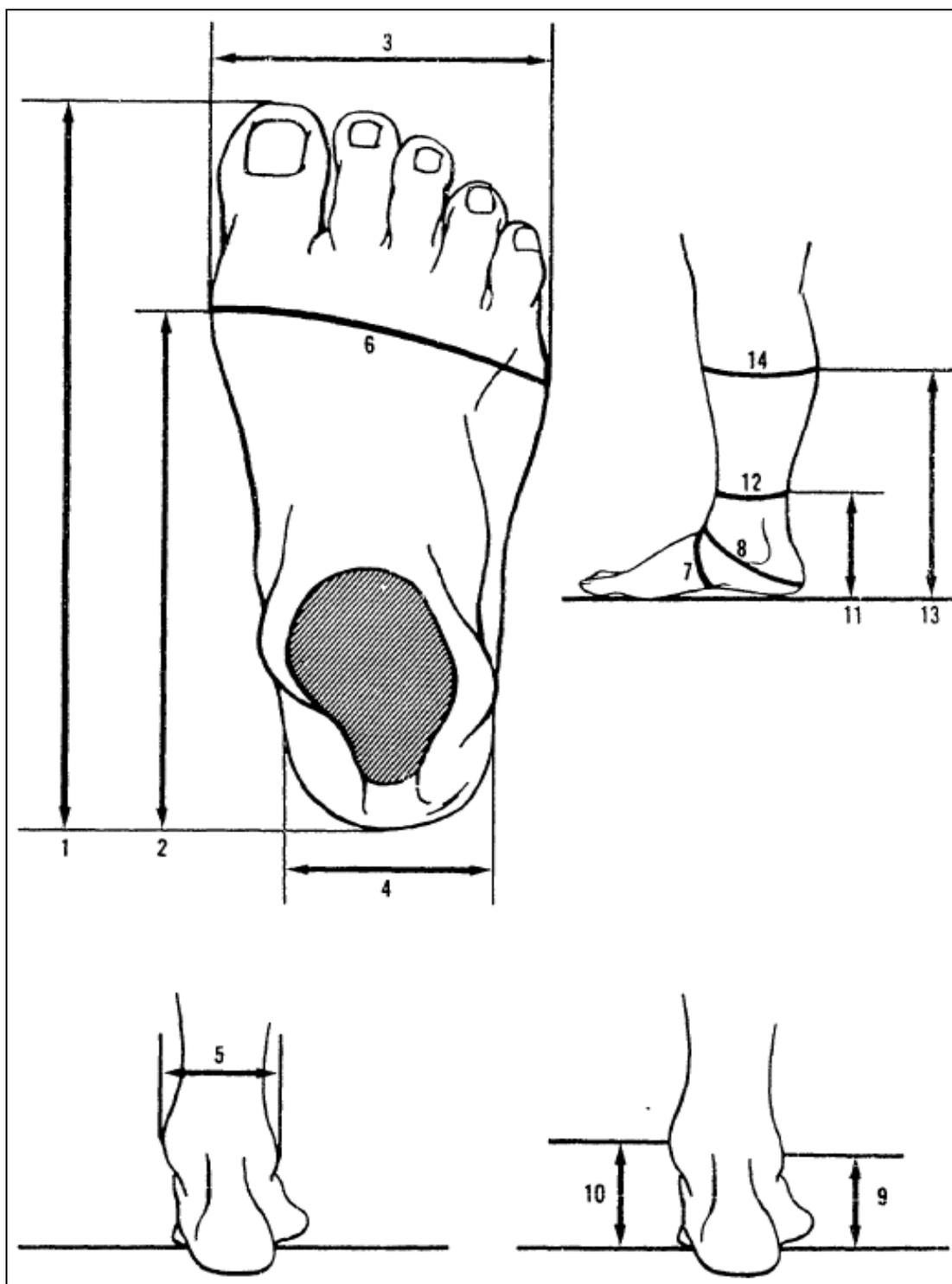
- | | |
|---------------------------------------|--|
| 6. Dorsal Arch Height | 22. Ankle Length |
| 8. Ball of Foot Height | 23. Instep Length |
| 9. First Toe Height | 24. Ball of Foot Length, Right |
| 10. Maximum Toe Height | 25. Foot Length, Right |
| 11. Outside Ball of Foot Height | 26. Ball of Foot Breadth,
Horizontal, Right |
| 16. Ball of Foot Circumference | 27. Outside Ball of Foot Length |
| 17. Heel Breadth, Right | 28. 5th Toe Length |
| 18. Ball of Foot Breadth,
Diagonal | 33. 1st-3rd Toe Breadth |

Grandezze	Uomo		Donna	
	Media	S.D.	Media	S.D.
1	175.71	7.13	161.85	6.57
2	34.28	2.32	31.72	2.41
3	12.70	0.97	10.82	0.88
4	8.12	0.65	7.17	0.67
5	7.26	0.72	6.59	0.69
6	8.88	0.65	8.05	0.61
7	3.03	0.60	2.89	0.59
8	3.91	0.28	3.59	0.24
9	2.20	0.21	1.94	0.20
10	2.55	0.26	2.30	0.22
11	2.93	0.28	2.70	0.23
12	36.97	2.66	35.18	2.04
13	22.38	1.40	20.82	1.11
14	34.28	1.72	30.89	1.41
15	26.16	1.33	23.30	1.05
16	25.18	1.27	22.66	1.07
17	7.02	0.44	6.33	0.42
18	10.54	0.56	9.50	0.48
19	6.98	0.44	6.27	0.42
20	25.10	1.30	22.54	1.08
21	75.72	11.47	60.27	6.66
22	10.84	0.72	9.65	0.62
23	11.37	0.78	10.23	0.72
24	19.67	1.07	17.75	1.10
25	26.96	1.37	24.38	1.30
26	10.09	0.54	9.14	0.46
27	16.66	1.01	14.92	0.98
28	21.72	1.14	19.57	1.12
29	19.55	1.12	17.64	1.07
30	26.91	1.31	24.36	1.28
31	10.09	0.55	9.11	0.49
32	7.31	0.40	6.52	0.35
33	7.19	0.53	6.44	0.43

1.3.3 Differenti categorie di americani a confronto

Titolo articolo: Comparative anthropometry of the foot

Robert M. White



- lunghezza del piede
- massima larghezza del piede
- larghezza del tallone

- distanza tra le proiezione del malleolo laterale e del malleolo mediale
- misura della circonferenza del piede a livello delle teste metatarsali
- circonferenza verticale del piede a livello dell'instep
- circonferenza diagonale del piede
- altezza del malleolo laterale
- altezza del malleolo mediale
- altezza della caviglia
- circonferenza della caviglia
- altezza del polpaccio: distanza tra il suolo e il punto in cui si ha la massima circonferenza della gamba
- circonferenza del polpaccio

	1		2		3		4		5		6		7		8	
	m	sd	m	sd	m	sd	m	sd	m	sd	m	sd	m	sd	m	sd
US Army Aviators 1959	27.08	1.24			10.13	0.53					24.89	1.57				
USAF Flying Personnel 1967	27.05	1.19	19.79	0.95	9.77	0.50			7.33	0.38	24.84	1.23	25.69	1.21	33.95	1.41
USA Basic Trainees 1966	26.85	1.26	19.66	1.00	9.92	0.54	6.84	0.45			25.18	1.42	26.83	1.65	34.08	1.63
Ft. Knox Foot Study 1946	26.84	1.16	19.26	0.90	9.80	0.52	6.96	0.47			25.18	1.16	25.83	1.14	34.41	1.55
Air control Trainees 1961	26.82	1.16			9.83	0.53										
USAF Basic Trainees 1965	26.78	1.29	19.41	1.00	9.83	0.55			7.44	0.39	25.34	1.27	27.31	1.37	34.22	1.56
US Army Men 1966	26.78	1.30	19.64	1.05	9.84	0.55	6.36	0.47			25.02	1.48	26.56	1.65	34.11	1.66
USA Basic Trainees 1977	26.75	1.33	19.71	1.18	9.92	0.56					25.15	1.29			34.02	1.74
USAAF Cadets 1942	26.72	1.12			9.83	0.48										
US Marine Corps 1966	26.70	1.29	19.58	1.06	9.80	0.52	6.82	0.44			25.12	1.31	26.33	1.44	34.13	1.61
USAF Flying Personnel 1950	26.68	1.15	19.40	0.86	9.65	0.47	6.69	0.37	7.49	0.38	24.45	1.20				
VA Veterans 1970	26.64	1.21			9.94	0.51										
US Navy Aviators 1964	26.62	1.20			10.24	0.77										
US Army Men 1946	26.51	1.21	19.33	1.12	9.82	0.63	6.70	0.53			24.63	1.28				
US Navy Recruits 1966	26.51	1.29	19.36	1.04	9.76	0.53	6.72	0.43			24.64	1.71	25.60	1.39	34.21	1.71
US Army Aviators 1970	26.49	1.27	19.16	1.04	9.99	0.61					24.51	1.20	27.08	1.33	33.31	1.58
USAAF Gunners 1942	26.33	1.27			9.71	0.49										
USAF Basic Trainees 1952	26.26	1.27			10.19	0.63	6.72	0.43			25.04	1.36				
Spanish American War Veterans 1959	26.01	0.99			9.98	0.48										
US Army women 1977	24.32	1.25	17.85	0.99	8.87	0.52	6.09	0.41			22.61	1.14	23.48	1.26	30.79	1.46
USAAF Nurses 1942	24.30	1.00			9.20	0.50										
WASP Pilots 1942	24.30	1.10			9.20	0.50										
USAF Women 1968	24.07	1.13			8.87	0.50										
USAF WAF Trainees 1952	23.94	1.17	17.32	0.82	9.09	0.53	5.72	0.57			23.30	1.23				
US Army Women 1946	23.93	1.11	17.73	0.90	9.05	0.57	5.94	0.44			21.89	1.15				
Stewardess Trainees 1971	23.87	1.05			8.81	0.47			6.28	0.29						

Appendice A

	9		10		11		12		13		14	
	m	sd	m	sd	m	sd	m	sd	m	sd	m	sd
US Army Aviators 1959												
USAF Flying Personnel 1967	7.04	0.54	8.57	0.57	13.72	1.15	22.41	1.26	35.55	2.22	37.19	2.27
USA Basic Trainees 1966							22.71	1.43	35.45	2.53	36.28	2.74
Ft. Knox Foot Study 1946												
Air control Trainees 1961							23.20	1.40			36.62	2.45
USAF Basic Trainees 1965	7.16	0.63	8.32	0.61	11.88	1.36	22.71	1.43	36.11	2.37	36.16	2.65
US Army Men 1966							22.69	1.44	35.42	2.70	36.60	2.67
USA Basic Trainees 1977							21.71	1.42			35.83	2.80
USAAF Cadets 1942												
US Marine Corps 1966							22.66	1.34	36.04	2.69	37.16	2.35
USAF Flying Personnel 1950	6.94	0.56	8.78	0.53			22.56	1.31			36.53	2.37
VA Veterans 1970												
US Navy Aviators 1964							22.54	1.25			37.49	2.20
US Army Men 1946											35.76	2.38
US Navy Recruits 1966							23.24	1.58	36.11	2.67	36.51	2.73
US Army Aviators 1970							22.07	1.26	34.45	2.19	37.30	2.41
USAAF Gunners 1942												
USAF Basic Trainees 1952												
Spanish American War Veterans 1959											34.29	2.72
US Army women 1977					10.86	1.02	20.73	1.25	32.55	2.30	35.09	2.51
USAAF Nurses 1942												
WASP Pilots 1942												
USAF Women 1968	6.77	0.59			11.19	1.35	21.09	1.29			34.14	2.25
USAF WAF Trainees 1952			6.03	0.39			21.51	1.23	33.09	2.71	34.08	2.48
US Army Women 1946												
Stewardess Trainees 1971							20.14	1.03			32.21	1.63

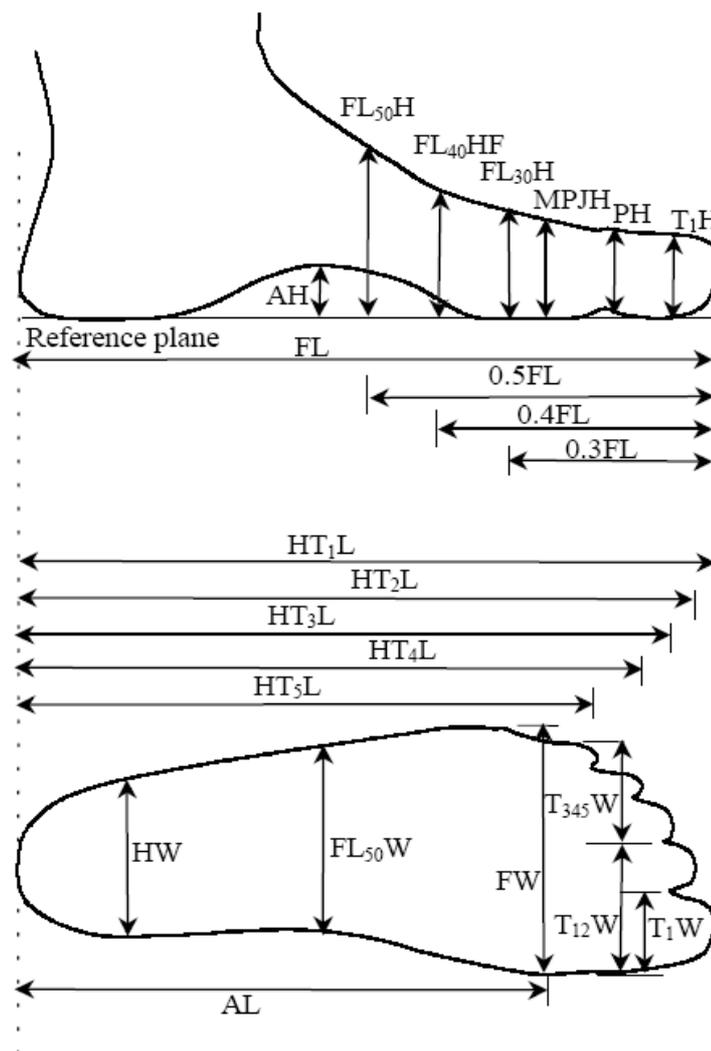
1.4 Dati raccolti su popolazione cinese

Titolo tesi: foot shape evaluation for footwear fitting

Titolo articolo: dimensions for fitting footwear

Ameersing Luximon, Hong Kong University

Soggetti: 50 uomini, età 18-39

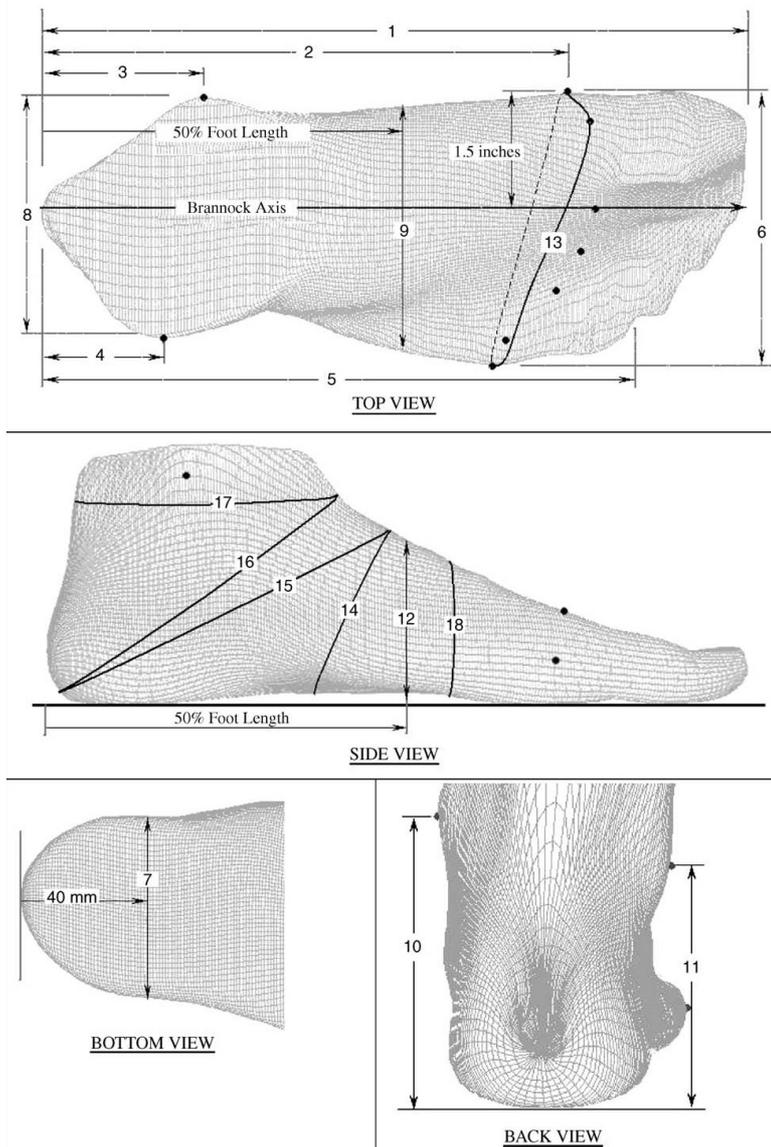


Grandezza	Media	S.D.
Peso (Kg)	66.2	11.26
Altezza (cm)	1720.0	62.71
Lunghezze (mm)		
FL	254.6	12.29
AL	184.9	10.30
CL	132.1	7.32
HT ₁ L	254.1	12.50
HT ₂ L	250.2	11.88
HT ₃ L	241.4	11.23
HT ₄ L	226.2	10.22
HT ₅ L	209.5	9.61
Larghezze (mm)		
FW	93.2	5.17
HW	65.6	4.96
AW	46.6	6.43
T ₁₂ W	48.5	4.45
T ₁ W	32.4	2.48
T ₃₄₅ W	39.4	5.09
FL ₅₀ W	82.3	4.75
Altezze (mm)		
T ₁ H	17.7	2.41
PH	27.6	3.20
MPJH	36.9	3.76
FL ₃₀ H	42.9	4.62
FL ₄₀ H	56.4	5.39
FL ₅₀ H	68.4	5.52
AH	30.6	5.09

Titolo articolo: Foot measurements from three dimensional scans: a comparison and evaluation of different methods

C.P.Witana et al., Hong Kong University

Soggetti: 20 soggetti (11 uomini, 9 donne)



Grandezze	Media	S.D.
Lunghezze (mm)		
1	250.6	12.7
2	183.3	9.7
3	61.4	5.8
4	53.0	4.9
5	202.6	9.6
Larghezze (mm)		
6	97.2	6.1
7	65.4	4.2
8	68.5	4.7
9	91.6	6.7
Altezze (mm)		
10	76.6	4.7
11	65.7	6.2
12	60.6	4.8
Circonferenze (mm)		
13	239.5	13.2
14	247.5	15.0
15	336.4	17.4
16	314.5	17.4
17	248.7	13.5
18	239.1	14.0

Bibliografia

Articoli

Arash Aminian, MD, Bruce J. Sangeorzan, MD, “The Anatomy of Cavus Foot Deformity”, *Foot Ankle Clin N Am*, 13:191–198, 2008

Bavornrit Chuckpaiwong, James A. Nunley, Nathan A. Mall, Robin M. Queen, “ The effect of foot type on in-shoe plantar pressure during walking and running”, *Gait & Posture*, 28: 405-411, January 2008

G. Gravante, F. Pomara, G. Russo, G. Amato, F. Cappello and C. Ridola, “Plantar Pressure Distribution Analysis in Normal Weight Young Women and Men With Normal and Claw Feet : A Cross-Sectional Study”, *Clinical Anatomy*, 18:245–250, 2005

G. Solis, M.S. Hennessy and T.S. Saxby, “ Pes cavus : a review”, *Foot and Ankle Surgery* , 6:145-153, 2000

George S Murley, Hylton B Menz² and Karl B Landorf, “A protocol for classifying normal- and flat-arched foot posture for research studies using clinical and radiographic measurements”, *Journal of Foot and Ankle Research*, 2009

Jack Crosbie, Joshua Burns, Robert A. Ouvrier, “Pressure characteristics in painful pes cavus feet resulting from Charcot–Marie–Tooth disease”, *Gait & Posture* 28 p. 545–551, 2008

Jason K. Gurney, Uwe G. Kersting, Dieter Rosenbaum, “Dynamic foot function and morphology in elite rugby league athletes of different ethnicity”, *Applied Ergonomics*, 40, p.554–559, November 2008

Josè Garcia-Hernández, Stella Heras, Alfons Juan, Roberto Paredes, Beatriz Nàcher, Sandra Alemany, Enrique Alcàntara and Juan Carlos González, “The MORFO3D Foot Database”, Universitat Politècnica de València, 2004

Joshua Burns, Jack Crosbie, Adrienne Hunt, Robert Ouvrier, “The effect of pes cavus on foot pain and plantar pressure”, *Clinical Biomechanics* 20: 877–882, March 2005

Martin S. Weseley, M.D, Philip A. Barenfeld, M.D., James M. Shea, M.D, and Arthur L. Einstein, M.D., “The congenital cavus foot, a follow-up report”

Michael R. Hawes and Daniela Soyak, “Quantitative morphology of the human foot in a North American population”, *Ergonomics*, Vol 37, No.7, 1213-1226, 1994

Rita Stagni, Alberto Leardini, Fabio Catani, Angelo Cappello, “A new semi-automated measurement technique based on X-ray pictures for ankle morphometry”, *Journal of Biomechanics*, 37, 1113–1118, 2004

Shuping Xiong, Ravindra S. Goonetilleke, Channa P. Witana, Thilina W. Weerasinghe, Emily Yim Lee Au, “Foot Arch Characterization : A Review, a New Metric, and a Comparison”, *Podiatr Med Assoc* 100(1) : 14-24, 2010

P. R. Cavanagh, E. E. Morag, A. J. M. Boulton, M. J. Young, K. T. Deffner and S. E. Pammert, “The relationship of static foot structure to dynamic foot function”, *J.*

Biomechanics, Vol 30, N 3, p. 243-250, 1997

William R. Ledoux,^{1,2,3} Eric S. Rohr,¹ Randal P. Ching,^{1,2,3} Bruce J. Sangeorzan^{1,3}, Effect of Foot Shape on the Three-Dimensional Position of Foot Bones, Orthopaedic Research Society, 24, 2176–2186, August 2006

Tesi

Ameersing Luximon, “Foot shape evaluation for footwear fitting”, tesi presentata all'Università della Scienza e della Tecnica di Hong Kong, August 2001

Channa P. Witana, Shuping Xiong, Jianhui Zhao, Ravindra S. Goonetilleke, “Foot measurements from three-dimensional scans: A comparison and evaluation of different methods”, International Journal of Industrial Ergonomics, 36, p.789–807, 2006

Kenneth R. Parham, Claire C. Gordon, Carolyn K. Bense, “Anthropometry of the foot and lower leg of u.s. army soldiers : fort jackson, sc – 1985”, united states army natick research development and engineering center natick, 1988

Robert M. White, “Comparative anthropometry of the foot”, United States Army Natick

Research & Development Laboratories, November 1981

Channa P. Witana, Shuping Xiong, Jianhui Zhao, Ravindra S. Goonetilleke, “Foot measurements from three-dimensional scans: A comparison and evaluation of different methods”, International Journal of Industrial Ergonomics, 36, p.789–807, 2006

Thomas G McPoil, Mark W Cornwall, Lynn Medoff, Bill Vicenzino, Kelly Forsberg and Dana Hilz, “Arch height change during sit-to-stand: an alternative for the navicular drop test” , Journal of Foot and Ankle Research, 2008

Testi

Stella, S. "I Quaderni Innovazione Per l'Industria Calzaturiera", Vigevano, Edizione Assomac, 2002

Viladot, A. "Patologia e clinica del piede", Verducci Editore, 1991

Morlacchi, A.; Belotti, G.; Gambino, F. "L'impresa calzaturiera: progettazione, tecnica e organizzazione.", Tre ScoreB. Editrice San Marco, 1998.

Siti

<http://www.giovanichetta.it/piede>, Dottor Giovanni Chetta, 2009

<http://www.piedepiatto.it/piedepiattobambino.html>

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA



FACOLTA' DI INGEGNERIA

**CONFIGURAZIONE MORFOMETRICA
DEL PIEDE IN RELAZIONE A
CONDIZIONI PATOLOGICHE**

Relatore: Ch.mo Prof. ARTURO N. NATALI

Correlatore: Ing. ANTONELLA FORESTIERO

Laureanda: MARTINA CORAZZOL

Corso di laurea triennale in Ingegneria Biomedica

Anno Accademico 2009/2010

