



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**SCUOLA DI INGEGNERIA BIOMEDICA**

**TESI DI LAUREA TRIENNALE  
IN INGEGNERIA BIOMEDICA**

**MISURE DEL VOLUME SOTTESO  
ALLA VOLTA PLANTARE:  
STUDIO DEGLI EFFETTI DOPO UN INTERVENTO  
CHIRURGICO CORRETTIVO DEL PIEDE PIATTO**

**Elaborato in Biomeccanica**

**Relatrice**

Prof.ssa Ing. ZIMI SAWACHA

**Presentata da**

EDOARDO CAMERLENGO

**Correlatori**

Ing. CLAUDIO BELVEDERE

Ing. ALBERTO LEARDINI

Ing. MAURIZIO ORTOLANI

**Sessione II**

**Anno Accademico 2023/24**

## INDICE

Introduzione.....	6
Scopo della ricerca.....	8
<b>1) ANATOMIA, FUNZIONALITÀ E PATOLOGIE DEL PIEDE.....</b>	<b>10</b>
1.1 Struttura scheletrica del piede.....	11
1.1.1 Piani anatomici del piede.....	11
1.1.2 Le ossa del piede.....	12
1.1.3 Struttura articolare.....	16
1.1.3.1 Le articolazioni del piede.....	16
1.1.4 Movimenti articolari.....	18
1.1.5 Struttura muscolare.....	19
1.2 Funzionalità del piede.....	21
1.3 Patologie del piede: aspetti generali.....	22
1.3.1 Patologie del piede: il piede cavo.....	23
1.3.2 Patologie del piede: il piede piatto .....	24
1.4 Caratterizzazione del piede piatto.....	25
1.4.1 I gradi di piattismo.....	28
1.4.2 Indicatori caratteristici del piede piatto.....	29
1.4.3 Il trattamento chirurgico, l'intervento di Grice-Green.....	30
1.4.4 Interventi possibili per la correzione dell'arco.....	32
<b>2) ANALISI E TECNICHE PER LA VALUTAZIONE BIOMECCANICA.....</b>	<b>34</b>
2.1 Analisi cinematica.....	34
2.2 Convenzioni articolari, giunto cardanico.....	35
2.3 La convenzione di Grood e Suntay.....	37
2.4 Analisi del cammino.....	39
2.4.1 Biomeccanica del piede sano.....	40
2.4.2 Biomeccanica del piede piatto.....	42

<b>2.5 Tecniche di valutazione standard.....</b>	<b>43</b>
<b>2.5.1 Pedana baropodometrica.....</b>	<b>44</b>
<b>2.5.2 Scanner 3-D.....</b>	<b>45</b>
<b>2.5.3 Tomografia assiale computerizzata standard.....</b>	<b>46</b>
<b>2.5.4 La Cone Beam Computer Tomography (CBCT) .....</b>	<b>48</b>
<b>3) TECNICHE INNOVATIVE PER LA VALUTAZIONE 3D DELLA DEFORMITÀ DELLA VOLTA PLANTARE.....</b>	<b>50</b>
<b>3.1 OnSight 3D extremity system, Carestream.....</b>	<b>51</b>
<b>3.2 Segmentazione delle immagini biomedicali.....</b>	<b>52</b>
<b>3.2.1 Segmentazione delle strutture ossee (mimics) .....</b>	<b>53</b>
<b>3.3 Protocollo di valutazione.....</b>	<b>54</b>
<b>3.4 Acquisizione e valutazione dei dati dei pazienti.....</b>	<b>55</b>
<b>3.5 Metodi impiegati.....</b>	<b>57</b>
<b>4) TECNICHE ALL'AVANGUARDIA PER VISUALIZZARE E RICOSTRUIRE LA VOLTA PLANTARE.....</b>	<b>59</b>
<b>4.1 Generalità.....</b>	<b>59</b>
<b>4.1.1 Ricostruzione della pianta del piede.....</b>	<b>60</b>
<b>4.1.1.1 Differenze tra pianta reale e parametrica.....</b>	<b>60</b>
<b>4.2 Come si comporta il programma in Matlab? .....</b>	<b>61</b>
<b>5) METODICHE DI VALUTAZIONE.....</b>	<b>66</b>
<b>5.1 Misure pre-operatorie.....</b>	<b>66</b>
<b>5.2 Misure post-operatorie.....</b>	<b>68</b>
<b>5.3 Confronto pre e post-operatorie.....</b>	<b>71</b>
<b>5.4 Analisi statica dei dati: Applicazioni del t-test su Matlab.....</b>	<b>73</b>
<b>5.5 Discussione sulle tecniche utilizzate dalla procedura.....</b>	<b>76</b>
<b>5.6 Discussione sui risultati ottenuti.....</b>	<b>77</b>
<b>5.7 I limiti della procedura adottata.....</b>	<b>78</b>
<b>6) CONCLUSIONE.....</b>	<b>79</b>

<b>6.1 Applicazioni e Sviluppi Futuri.....</b>	<b>80</b>
<b>APPENDICE.....</b>	<b>82</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>103</b>



## Introduzione

Il piede, da sempre oggetto di studio, rappresenta una delle parti più complesse e cruciali del corpo umano. È composto da 26 ossa, 33 articolazioni e oltre 100 tra muscoli, tendini e legamenti, assolve a numerose funzioni fondamentali quali la locomozione, la stabilizzazione, l'assorbimento degli impatti e la trasmissione della forza.

Il piede si suddivide in tre parti principali: il retro-piede, il meso-piede e l'avampiede. Ognuna di queste sezioni gioca un ruolo cruciale nelle varie funzioni del piede, dalla stabilità al movimento. Il retro-piede è la parte posteriore del piede e svolge un ruolo importante nella stabilità e nel supporto durante la deambulazione. Il meso-piede è la parte centrale del piede e svolge una funzione di stabilità e supporto dell'arco plantare durante il movimento distribuendo così il peso del corpo in modo uniforme e permettendo una corretta biomeccanica del piede. L'avampiede è la parte anteriore del piede e svolge un ruolo essenziale nella flessibilità, equilibrio e propulsione durante la deambulazione. L'arco plantare, che si sviluppa nei primi anni di vita, svolge un ruolo chiave nell'assorbimento degli shock e nella biomeccanica del cammino. La sua formazione è influenzata da fattori genetici, ambientali e dalla tipologia di carico a cui il piede è sottoposto durante lo sviluppo [6].

Storicamente, l'analisi dell'arco plantare è stata condotta attraverso metodi bidimensionali, come la podografia, che limitano la comprensione completa della struttura tridimensionale e dinamica dell'arco plantare pur fornendo informazioni utili [7]. Le tecniche radiologiche hanno rappresentato un passo in avanti significativo nella valutazione delle strutture ossee del piede, permettendo una visualizzazione dettagliata delle componenti anatomiche e contribuendo alla diagnosi di diverse patologie del piede [1].

La tomografia computerizzata a fascio conico (CBCT) in ortostasi offre una versione innovativa e più accurata della struttura ossea del piede sotto carico reale, permettendo una valutazione più precisa dell'arco plantare e delle possibili patologie ad esso associate [5].

Non solo è importante l'ortostasi ma tutta la valutazione 3D, che consente di misurare anche lo spazio al di sotto della volta plantare, ampliando così la comprensione delle dinamiche biomeccaniche e delle eventuali problematiche legate all'architettura del piede. Alcune patologie podologiche possono compromettere la forma e la funzione del piede, provocando dolore, instabilità e difficoltà nel camminare. Tra queste patologie debilitanti, il piede piatto rappresenta una delle condizioni più comuni, potendo colpire individui di tutte le età e stili di vita [2]. Nota anche come “abbassamento dell’arco plantare”, questa condizione si manifesta con un appiattimento dell’arco plantare che provoca un contatto quasi completo o totalmente completo della pianta del piede con il suolo durante la deambulazione [2]. Nei casi più lievi, il piede piatto può non causare alcun disagio o sintomo; tuttavia, in situazioni più gravi, può provocare dolore, gonfiore, stanchezza e difficoltà a camminare o a stare in piedi per lunghi periodi [2]. Questa condizione può essere congenita o acquisita nel corso della vita e può interessare uno o entrambi i piedi [2]. Se non adeguatamente trattato, il piede piatto può causare una serie di problemi ortopedici, tra cui dolore ai piedi, alle ginocchia e alla schiena, deformità e disfunzioni del piede e degli arti inferiori [2].

È importante notare che, dopo correzioni chirurgiche, si osserva un aumento dello spazio sotto l’arco plantare, il che può influenzare positivamente la funzionalità e il comfort del piede durante la deambulazione [5]. Per questi motivi è di fondamentale importanza sviluppare metodi di diagnosi e trattamenti precisi ed efficaci per studiare il piede piatto. In particolare, la valutazione del volume dell’arco plantare può fornire informazioni rilevanti riguardo la gravità della patologia e l’efficacia dell’intervento chirurgico nella correzione di questa deformità [4].

## Scopo della ricerca

L'obiettivo principale di questa tesi è esplorare in modo approfondito l'arco plantare del piede in pazienti affetti da piede piatto, ponendo particolare enfasi sul calcolo del volume dell'arco plantare mediante l'utilizzo della tecnologia avanzata del Cone Beam Computed Tomography (CBCT) [3]. Questo studio si avvale del CBCT per effettuare una valutazione precisa e dettagliata della volta plantare, sfruttando le potenzialità di questa metodica nel contesto ortopedico [3]. La ricerca è condotta in collaborazione con l'ospedale Ortopedico Rizzoli di Bologna, dove sono stati raccolti i dati di 5 pazienti attraverso la CBCT [3]. L'analisi del volume dell'arco plantare rappresenta il fulcro della ricerca, poiché permette di ottenere una misurazione completa e accurata delle caratteristiche morfologiche e strutturali dell'arco stesso, fornendo informazioni cruciali per comprendere meglio la patologia del piede piatto e per sviluppare interventi terapeutici più mirati e efficaci [3].

Il focus specifico della ricerca è duplice: valutare l'efficacia dell'intervento chirurgico di Grice-Green, una procedura ortopedica consolidata per la correzione dell'arco plantare nei pazienti con piede piatto, e fornire un proof-of-concept di una nuova metodica per caratterizzare la volta plantare in 3D usando i volumi calcolati dei vari pazienti [2]. Attraverso l'analisi comparativa del volume dell'arco plantare prima e dopo l'intervento, lo studio mira a determinare l'impatto effettivo della chirurgia sulla condizione del piede piatto [2]. L'analisi pre e post-chirurgica è condotta con il supporto di chirurghi e specialisti medici, consentendo di visualizzare e valutare in modo chiaro e completo l'evoluzione della condizione del piede piatto dopo l'intervento [2].

Per raggiungere questi obiettivi, la tesi si concentrerà sui seguenti aspetti principali:

- Utilizzo della CBCT per una valutazione dettagliata e precisa della morfologia e del volume dell'arco plantare, evidenziando le potenzialità di questa metodica nell'analisi delle deformità del piede [3].
- Sviluppo e applicazione di un algoritmo Matlab specifico per l'elaborazione e l'analisi dei dati STL, mirato al calcolo del volume dell'arco plantare [3].
- Confronto dei dati pre e post-intervento chirurgico di Grice-Green per valutare l'efficacia del trattamento nella correzione della deformità plantare [2].



Il primo capitolo di questa tesi è dedicato alla descrizione dettagliata dell'anatomia del piede, con particolare attenzione ai segmenti ossei e alle articolazioni. Viene inoltre analizzata la funzionalità del piede e le principali patologie che possono comprometterne l'efficienza. Il secondo capitolo introduce le basi della valutazione biomeccanica del piede, illustrando le metodologie tradizionali e le tecniche non invasive più diffuse per lo studio della biomeccanica del piede e della caviglia. Verranno descritte le strumentazioni e i protocolli utilizzati per ottenere dati precisi sulla funzionalità articolare. Il terzo capitolo si concentra sulle tecniche di diagnostica per immagini utilizzate a livello internazionale per la valutazione delle deformità del piede. Verranno presentate le tecnologie 3D all'avanguardia, il dispositivo utilizzato in questo studio, il protocollo sperimentale e i passaggi eseguiti nell'elaborazione dei dati acquisiti che hanno portato ai modelli CAD della volta plantare. Nel quarto capitolo, saranno illustrate le tecniche avanzate sfruttate dagli algoritmi di ricostruzione e la loro applicazione dettagliata su soggetti. Verranno descritti i processi di visualizzazione e ricostruzione utilizzati per creare modelli tridimensionali dettagliati della volta plantare. Il quinto capitolo riporta i risultati dei test eseguiti per verificare la robustezza delle metodiche di valutazione. Verranno presentati i sistemi di riferimento utilizzati e i risultati sperimentali ottenuti dall'applicazione delle metodiche sui soggetti studiati, accompagnati da osservazioni critiche. Il sesto capitolo fornisce una sintesi delle considerazioni e delle discussioni conclusive riguardanti le metodiche di valutazione del piede, le problematiche emerse durante lo sviluppo delle tecniche, le possibili applicazioni future e i miglioramenti auspicabili. Infine, verranno riassunte le principali scoperte e le prospettive future nel campo della valutazione e del trattamento del piede. Tutte le fasi del progetto, inclusa l'acquisizione dei dati dei pazienti e l'elaborazione dei modelli CAD, sono state svolte presso il Laboratorio di Analisi del Movimento del Centro di Ricerca dell'Istituto Ortopedico Rizzoli di Bologna. La segmentazione delle immagini e la creazione dei modelli CAD sono state effettuate presso la stessa sede con il software Mimics.

# CAPITOLO 1

## **Anatomia, funzionalità e patologie del piede**

Il piede riveste un ruolo cruciale nel corpo umano in quanto responsabile della postura eretta, della capacità di camminare, della stabilizzazione, della propulsione e dell'equilibrio [10]. L'anatomia del piede è complessa e include un'ampia rete di ossa, articolazioni, muscoli e tessuti molli che collaborano per svolgere le sue funzioni meccaniche [10].

La conoscenza dell'anatomia del piede è essenziale per comprendere la sua funzionalità e per diagnosticare e trattare le patologie correlate [10]. Le patologie del piede sono molto diffuse e possono essere causate da fattori genetici, lesioni, malattie croniche e usura naturale [10].

Le patologie più comuni del piede comprendono il piede piatto, il piede cavo, la fascite plantare, le lesioni ai tendini e alle articolazioni e le deformità dell'alluce, come l'alluce valgo [10]. Queste patologie possono provocare dolore, rigidità, difficoltà nel camminare e una ridotta qualità di vita [10].

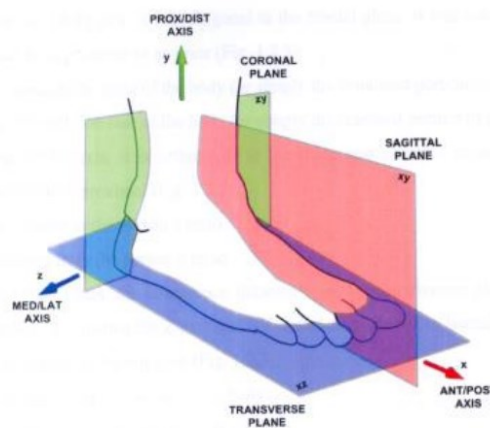
Le tecnologie di imaging, come la tomografia computerizzata a fascio conico (CBCT) e la risonanza magnetica (MRI), possono essere utilizzate per valutare l'anatomia del piede e le relative patologie [3]. Vengono qui in aiuto le tecnologie di prototipazione rapida, come la stampa 3D e la stereolitografia, che consentono la creazione di protesi personalizzate e soluzioni terapeutiche adatte alle specifiche esigenze del paziente [3].

In questo capitolo, verranno esaminati in dettaglio l'anatomia e la fisiologia del piede, con particolare attenzione alle strutture scheletriche, articolari e muscolari [10]. Verranno inoltre discusse le patologie più comuni del piede, le loro cause e i trattamenti disponibili [10]. La comprensione dell'anatomia e delle patologie del piede come già detto, è fondamentale per lo sviluppo di soluzioni ingegneristiche avanzate volte al trattamento e alla cura delle patologie podologiche [10].

## 1.1: Struttura scheletrica del piede

Il piede è una struttura biomeccanica complessa che svolge diverse funzioni durante la postura eretta e la deambulazione. La struttura scheletrica del piede è composta da numerose ossa, articolazioni e legamenti che cooperano per offrire supporto, equilibrio e stabilità durante il movimento.

### 1.1.1: Piani anatomici del piede



*Figura 1.1: I piani anatomici da prendere in considerazione nel piede [10]*

I piani anatomici del corpo umano sono utilizzati per descrivere l'organizzazione spaziale del corpo in termini di tre dimensioni [10]. Essi sono essenziali per comprendere la posizione delle strutture anatomiche e la loro relazione reciproca. In generale, ci sono tre piani anatomici principali: il piano sagittale, il piano coronale e il piano trasversale. Il piano sagittale divide il corpo in due parti simmetriche, destra e sinistra. Il piano coronale divide il corpo in una parte anteriore e una posteriore. Il piano trasversale divide il corpo in una parte superiore e una inferiore.

Nel piede, i piani anatomici vengono utilizzati per descrivere la posizione e l'orientamento delle ossa, delle articolazioni e dei muscoli. Ad esempio, il piano sagittale viene utilizzato per descrivere il movimento della caviglia durante la flessione e l'estensione, mentre il piano coronale viene utilizzato per descrivere il movimento della caviglia durante l'inversione e l'eversione. La conoscenza dei piani anatomici del corpo umano è fondamentale per gli ingegneri biomedici che

lavorano nella progettazione di dispositivi ortopedici e protesi per il piede. La capacità di descrivere con precisione la posizione e l'orientamento delle strutture anatomiche consente di progettare dispositivi che si adattano perfettamente alla geometria del piede e che ripristinano la funzionalità del piede compromessa da patologie o traumi.

## 1.1.2 Le ossa del piede

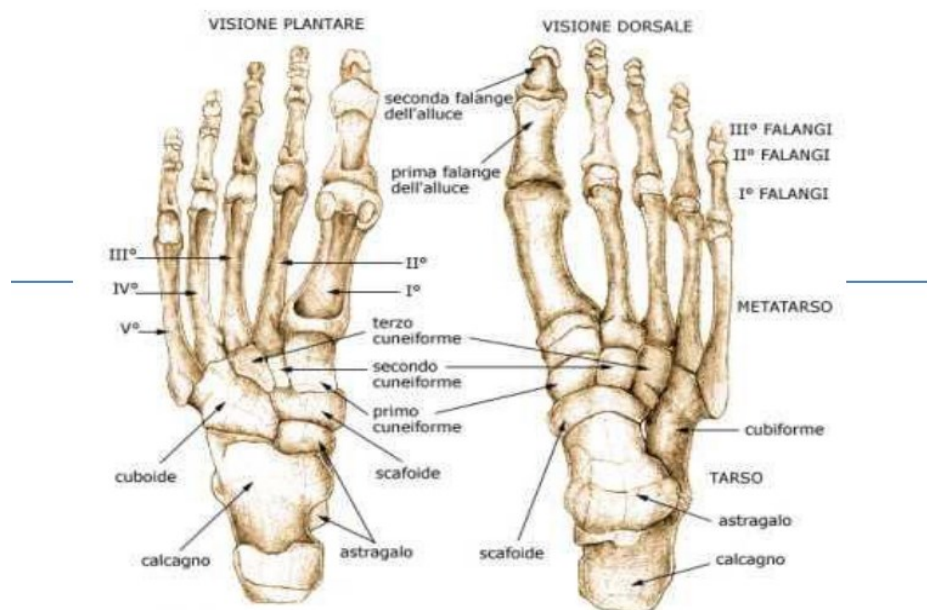


Figura 1.2: Le 26 ossa del piede

Il piede, come già anticipato, è composto da un totale di 26 ossa, suddivise in tre gruppi principali: tarso, metatarso e falangi.

Il tarso è la parte posteriore del piede e comprende sette ossa: il calcagno, l'astragalo, il navicolare, il cuboide e le tre ossa cuneiformi (mediale, intermedia e laterale) [16].

L'astragalo è l'osso di congiunzione tra il piede e la gamba e forma l'articolazione talocrurale con la tibia e il perone; è un osso di forma cuboide che presenta una testa articolare superiore, una faccetta articolare laterale e una faccetta articolare mediale, che si articolano rispettivamente con la tibia e il perone, formando l'articolazione tibiotarsica, che permette i movimenti di dorsiflessione e plantare del piede.

L'astragalo, in particolare, funge da punto di ancoraggio per la formazione dell'arco longitudinale e contribuisce alla stabilità della caviglia e del piede durante il movimento. [1]

Svolge un ruolo importante nella trasmissione del carico tra la gamba e il piede, poiché è il punto di convergenza dei movimenti dell'arto inferiore e il punto di partenza delle forze che si distribuiscono sul piede; è inoltre coinvolto nella stabilità e nel movimento della caviglia.

Il calcagno è l'osso più grande e robusto del piede, situato nella parte posteriore del tallone. È anche l'osso che riceve la maggior parte del peso del corpo durante la deambulazione.

Anatomicamente, il calcagno ha una forma simile ad un cubo, con una faccia superiore, una faccia inferiore e quattro facce laterali. La faccia superiore è convessa ed articolata con la parte inferiore della tibia e della fibula, mentre la faccia inferiore è piatta e fornisce un'importante superficie di appoggio per la pianta del piede [2].

Le facce laterali, invece, forniscono attacco ai muscoli del piede e del polpaccio. In particolare, la faccia laterale interna è il punto di inserzione per il muscolo flessore lungo dell'alluce.

Il calcagno è anche attraversato dal canale del tendine del muscolo flessore che passa per le dita, che si estende dalla faccia laterale esterna alla faccia inferiore

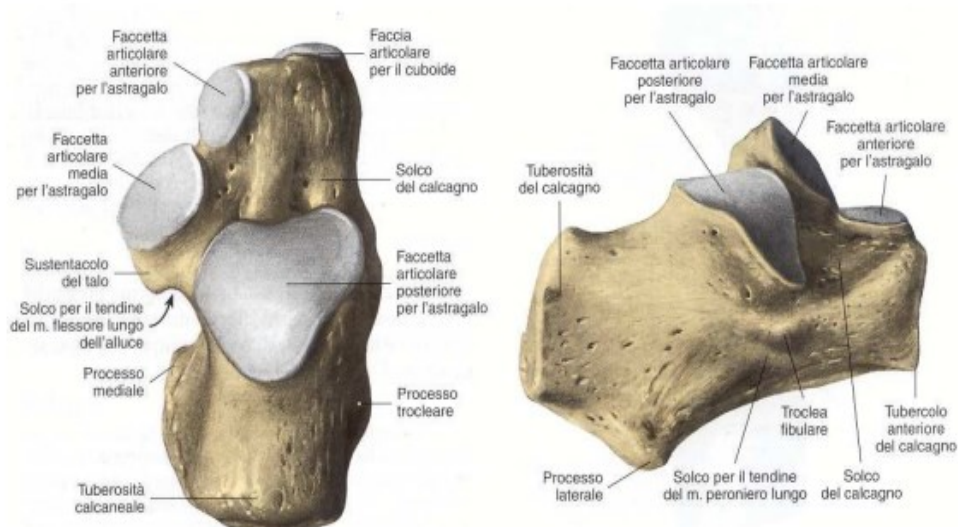


Figura 1.3: La struttura ossea del calcagno

dell'osso. Questo canale fornisce un passaggio protetto per il tendine e aiuta a prevenire eventuali lesioni.

Il cuboide è un osso corto del piede che si trova nella regione laterale del tarso, tra il quarto e il quinto metatarso. Il suo nome deriva dalla forma cubica che presenta.

Il cuboide presenta sei facce, una delle quali è rivolta verso l'alto e le altre cinque verso il basso. La faccia superiore è articolata con l'astragalo, mentre quelle inferiori formano articolazioni con il quinto metatarso e con i due ossi cuneiformi.

Il cuboide ha un ruolo importante nella biomeccanica del piede, in quanto partecipa alla formazione dell'arco longitudinale laterale. Inoltre, le sue articolazioni sono importanti per la flessione plantare e l'inversione del piede [3].

Le ossa cuneiformi sono tre ossa piccole e a forma di cuneo che si trovano nella regione mediale del piede. Sono chiamate rispettivamente cuneiforme mediale, intermedia e laterale.

- 1) La cuneiforme mediale è la più grande delle tre e si articola con il navicolare e con il primo osso metatarsale. Ha una forma quadrangolare con due superfici articolari piate e una faccia inferiore convessa.
- 2) La cuneiforme intermedia è la più piccola delle tre e si articola con la cuneiforme mediale, la cuneiforme laterale, il navicolare e il secondo osso metatarsale. Ha una forma triangolare con una faccia superiore articolare, una faccia inferiore convessa e due facce laterali che si articolano con le altre ossa cuneiformi.
- 3) La cuneiforme laterale è più grande della cuneiforme intermedia e si articola con il cuboide, la cuneiforme intermedia, il navicolare e il terzo osso metatarsale. Ha una forma trapezoidale con due superfici articolari piate e una faccia inferiore convessa [4].

Il metatarso è la parte centrale del piede e consiste in cinque ossa lunghe che vanno dalla base delle dita fino alla metà del piede. Ciascuna di queste ossa è numerata da 1 a 5, partendo dal pollice del piede.

I metatarsi sono cinque ossa lunghe situate nella parte anteriore del piede, tra le ossa del tarso e le falangi delle dita. Ogni metatarso è costituito da una base, un corpo e

una testa. La base del metatarso è in contatto con le ossa del tarso e la testa si articola con le falangi delle dita.

Il primo metatarso, che si articola con l'osso dell'alluce, è il più corto e più robusto dei cinque metatarsi. Il secondo e il terzo metatarso sono di lunghezza simile e si estendono al centro del piede. Il quarto e il quinto metatarso sono i più lunghi e più sottili dei cinque [5].

Ogni metatarso presenta una superficie superiore convessa e una superficie inferiore piatta. La superficie superiore è in contatto con le ossa del tarso, mentre la superficie inferiore è in contatto con il suolo. La forma dei metatarsi è importante per la distribuzione del peso corporeo durante la fase di spinta del passo.

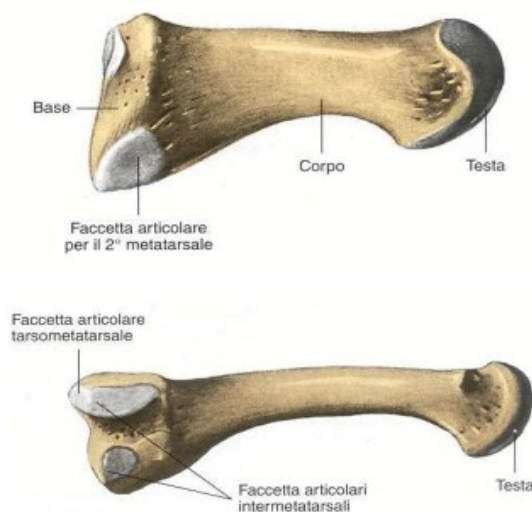


Figura 1.4: La struttura ossea del metatarso

Le falangi sono le ossa delle dita del piede e sono divise in tre gruppi: falangi prossimali, medie e distali. Le falangi sono delle ossa lunghe e sottili che costituiscono la parte distale delle dita del piede. Ci sono tre falangi in ciascuna delle quattro dita del piede, mentre solo il primo dito, il cosiddetto "alluce", ha due falangi.

Ogni falange è costituita da una testa, un corpo e una base. La testa è l'estremità più prossimale dell'osso, mentre la base è quella più distale. Il corpo è la porzione intermedia dell'osso.

Le falangi sono importanti per la funzionalità del piede in quanto consentono il movimento delle dita e la flessione plantare ovvero il movimento di piegamento

della punta del piede verso l'alto e il basso. Esse, inoltre, forniscono supporto e stabilità alla volta plantare durante la fase di spinta del passo e durante il contatto con il terreno per l'equilibrio e la camminata [6].

### **1.1.3: Struttura Articolare**

Il piede è costituito da numerose articolazioni, che permettono di eseguire movimenti complessi e di sostenere il peso del corpo. Queste articolazioni sono responsabili dell'equilibrio e della stabilità del piede e, quando funzionano correttamente, permettono una corretta distribuzione delle forze e una adeguata biomeccanica del piede.

#### **1.1.3.1 Le articolazioni del piede**

Le articolazioni del piede sono classificate in tre gruppi: articolazioni della caviglia, articolazioni del retro-piede e articolazioni del metatarso-falangee.

##### **Articolazioni della caviglia:**

Articolazione talo-crutale: si trova tra l'astragalo e la tibia, permette la flessione plantare e dorsale del piede [16].

Articolazione subtalare: si forma tra l'astragalo e il calcagno, contribuisce alla stabilità della caviglia e permette l'inversione e l'eversione del piede [16].

Articolazione talo-navicolare: connette l'astragalo con l'osso navicolare e contribuisce alla flessione plantare e dorsale del piede.

##### **Articolazioni del retro-piede:**

Articolazione calcaneo-cuboidea: si trova tra il calcagno e il cuboide, consente il movimento laterale del piede e partecipa alla formazione dell'arco longitudinale laterale.



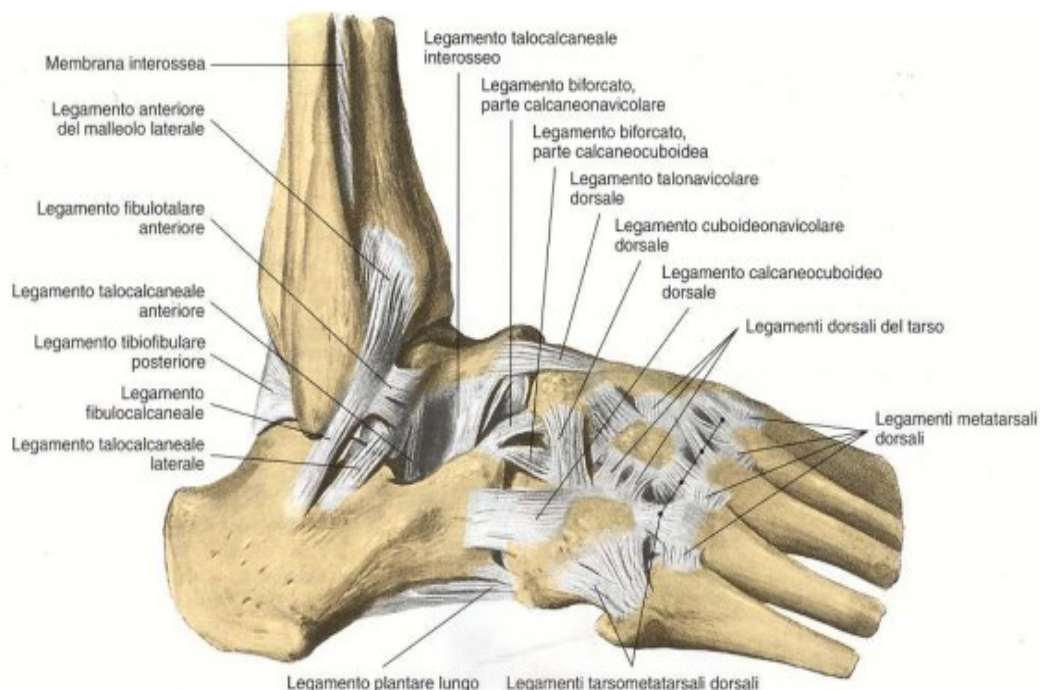
Articolazione calcaneo-astragolica postero-laterale: è un'articolazione meno mobile situata tra il calcagno e l'astragalo, contribuisce all'inversione e all'eversione del tallone.

### **Articolazioni del metatarso-falangee:**

Le articolazioni metatarso-falangee sono articolazioni sinoviali che connettono i metatarsi alle falangi. Queste articolazioni permettono il movimento di flessione dorsale e plantare delle dita del piede e di abduzione e adduzione delle dita.

Insieme, queste articolazioni permettono al piede di muoversi in modo fluido e di svolgere correttamente le principali funzioni del piede, come il supporto del peso corporeo, l'equilibrio e l'adattamento alle varie superfici durante la deambulazione.

La volta plantare del piede rappresenta una struttura dinamica e adattabile che offre supporto e stabilità durante la deambulazione e altre attività quotidiane. La sua formazione e il suo mantenimento dipendono dalla corretta funzione delle ossa e delle articolazioni del piede, che lavorano in sinergia per assicurare un adeguato supporto e una distribuzione efficace delle forze durante il movimento [16].



*Figura 1.5: Le articolazioni del piede*

## 1.1.4 Movimenti articolari

Il piede è costituito da numerose articolazioni che lavorano in sinergia per permettere una vasta gamma di movimenti. La capacità del piede di muoversi in modo preciso e controllato è fondamentale per la sua funzione e la sua efficacia nel supporto del peso corporeo durante la deambulazione. Il movimento articolare del piede è suddiviso in diverse categorie di movimenti, tra cui:

- **Flessione plantare:** si verifica quando la punta del piede si avvicina al pavimento (come quando si preme l'acceleratore di un'automobile). [1]
- **Flessione dorsale (estensione plantare):** si verifica quando il piede si estende verso l'alto (come quando si solleva il piede dal pedale dell'acceleratore). [1]
- **Inversione:** si verifica quando la pianta del piede si sposta verso l'interno (come quando si cammina sul bordo esterno del piede). [1]
- **Eversione:** si verifica quando la pianta del piede si sposta verso l'esterno (come quando si cammina sul bordo interno del piede). [1]

Questi movimenti articolari sono resi possibili dalla presenza di numerose articolazioni, come l'articolazione tibio-tarsica, l'articolazione sottomalleolare, l'articolazione talo-calcaneare, l'articolazione talo-navicolare, l'articolazione calcaneo-cuboidea, l'articolazione cuneo-metatarsale e l'articolazione metatarso-falangea. Questi movimenti sono controllati da una serie di muscoli e legamenti che si trovano nella zona del piede e della caviglia. Questi muscoli e legamenti lavorano insieme per creare la forza e la stabilità necessarie per supportare il peso corporeo e mantenere l'equilibrio durante la deambulazione.

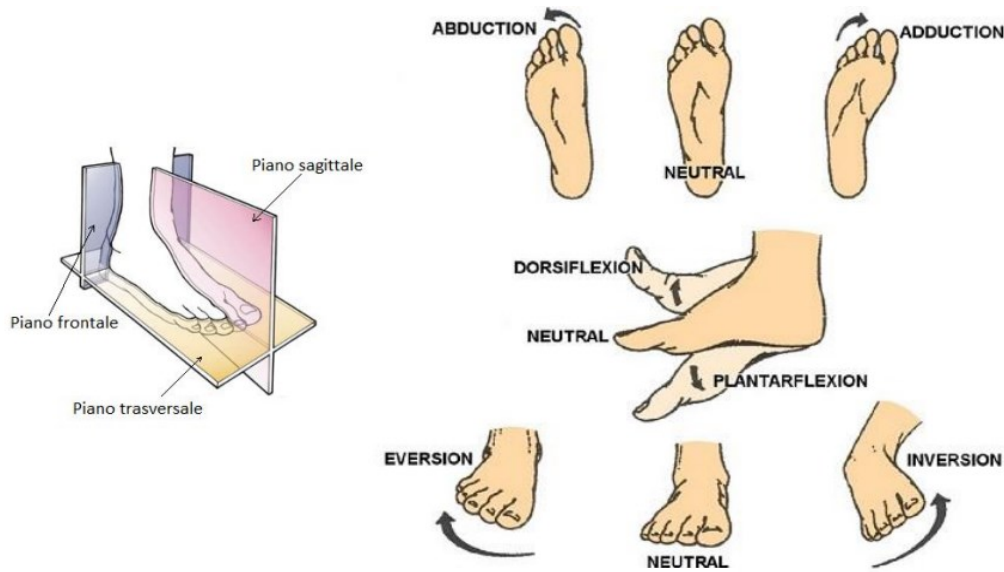


Figura 1.6: I possibili movimenti del piede

## 1.1.5: Struttura muscolare

Il piede è costituito da una complessa struttura muscolare che permette la sua funzione di supporto e movimento. I muscoli del piede possono essere suddivisi in due gruppi principali: intrinseci ed estrinseci [10].

I muscoli intrinseci del piede si trovano completamente all'interno del piede e sono responsabili del movimento delle dita e della flessione e dell'estensione del piede. Questi muscoli sono divisi in tre gruppi: dorsali, plantari e interossei [6].

Il gruppo dorsale è costituito dai muscoli estensori, si trovano sia nelle ossa del piede sia nelle dita dei piedi. Questi muscoli sono responsabili dell'estensione delle dita del piede e dell'alzata dell'avampiede durante la fase di spinta del passo [6].

Il gruppo plantare e il gruppo interossei sono costituiti dai muscoli flessori che si trovano tra le ossa del piede. Questi muscoli sono responsabili della flessione plantare del piede e della flessione delle dita del piede, dell'estensione delle dita del piede, nonché dell'abduzione e adduzione delle dita [6].

I muscoli estrinseci del piede, invece, si trovano al di fuori del piede e sono responsabili del movimento del piede e dell'equilibrio. Questi muscoli sono divisi in due gruppi principali: anteriori e posteriori [11].

Il gruppo muscolare anteriore è costituito dai muscoli tibiali anteriori, peronei anteriori ed estensori delle dita del piede. Questi muscoli sono responsabili della flessione dorsale del piede, dell'inversione e dell'eversione del piede [11].

Il gruppo muscolare posteriore, invece, è costituito dai muscoli tricipiti surali (gastrocnemio e soleo) e dal muscolo plantare. Questi muscoli sono responsabili dell'estensione plantare del piede e della flessione plantare dell'articolazione della caviglia [11].

La corretta funzione di tutti questi muscoli è essenziale per il mantenimento della postura, dell'equilibrio e della capacità di camminare e correre in modo efficiente. La conoscenza della struttura muscolare del piede è fondamentale per comprendere e trattare le patologie e le lesioni muscolari che possono interessare questa parte del corpo.

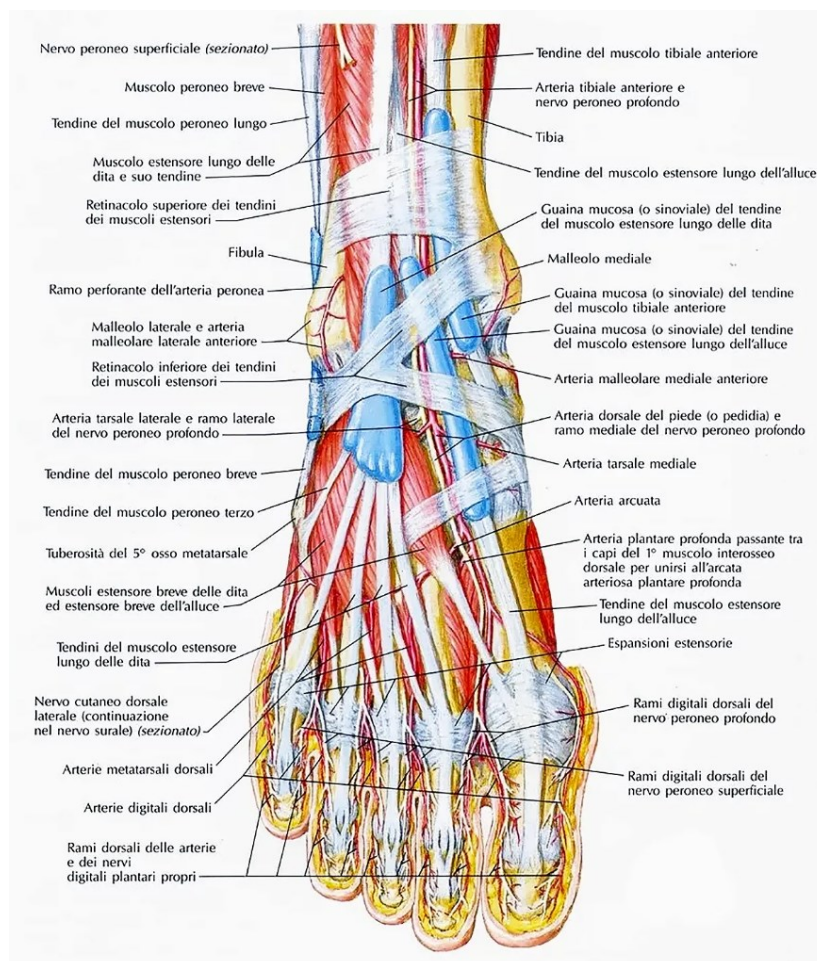


Figura 1.7: La struttura muscolare del piede

## 1.2 Funzionalità del piede

Il piede offre molteplici funzioni all'organismo. Esso sostiene il peso del corpo, permette il movimento e garantisce stabilità durante la camminata, la corsa e altre attività motorie. La sua complessa architettura, formata da ossa, articolazioni, muscoli, tendini e legamenti, assicura la distribuzione delle forze e delle pressioni, la trasmissione di energia cinetica e la regolazione del movimento [10].

Le principali funzioni del piede includono:

- **Sostegno e stabilità:** l'arco plantare contribuisce a mantenere la stabilità del piede e a distribuire il peso del corpo in modo equilibrato durante la deambulazione. Nel piede piatto, la compromissione dell'arco plantare può causare uno squilibrio nella distribuzione del peso, portando a una maggiore pressione su alcune aree del piede e potenzialmente a dolore e affaticamento. L'intervento di Grice-Green mira a correggere l'arco plantare, migliorando la stabilità e il sostegno del piede [12].
- **Assorbimento degli impatti:** l'arco plantare funge da ammortizzatore naturale, assorbendo gli impatti generati dal contatto con il suolo e proteggendo le strutture superiori del corpo. Un arco plantare ridotto o assente nel piede piatto può compromettere questa funzione, aumentando il rischio di dolore e lesioni alle ginocchia, ai fianchi e alla colonna vertebrale. La valutazione dell'efficacia dell'intervento di Grice-Green nella correzione dell'arco plantare può aiutare a determinare se la procedura contribuisce a migliorare l'assorbimento degli impatti nel piede piatto [13].
- **Propulsione e flessibilità:** la flessibilità dell'arco plantare è fondamentale per la propulsione e la capacità di adattarsi alle diverse superfici durante la deambulazione. Nel piede piatto, la riduzione dell'arco può limitare la mobilità del piede e influenzare negativamente la qualità del cammino. L'intervento di Grice-Green mira a ripristinare l'arco plantare e la flessibilità del piede, migliorando la propulsione e l'adattabilità alle superfici [15].
- **Termoregolazione:** il piede contribuisce alla regolazione della temperatura corporea. I vasi sanguigni presenti nel piede si dilatano o si restringono a

seconda delle condizioni ambientali, facilitando il rilascio di calore e aiutando a mantenere una temperatura corporea stabile. Inoltre, la sudorazione nella pianta del piede aiuta a dissipare il calore e a regolare la temperatura [16].

- **Equilibrio e percezione:** il piede è dotato di numerosi recettori sensoriali e meccanocettori che trasmettono informazioni al sistema nervoso centrale riguardo alla posizione e al movimento del piede stesso. Questo feedback sensoriale è cruciale per mantenere l'equilibrio, coordinare i movimenti e percepire le variazioni nel terreno e nell'ambiente circostante. La sensibilità del piede può essere influenzata da varie condizioni, tra cui patologie neurologiche, vascolari e ortopediche, come il piede piatto [10].

### 1.3 Patologie del piede: aspetti generali

Le patologie del piede possono causare dolore, disagio e limitare la mobilità, influenzando negativamente la qualità della vita di una persona. Queste patologie possono essere congenite o acquisite e possono essere influenzate da diversi fattori come la genetica, l'età, l'uso improprio o eccessivo e il trauma [10].

Di seguito sono elencate alcune delle principali patologie del piede:

- **Alluce valgo:** deformità dell'alluce caratterizzata da un angolo anomalo tra l'alluce e il primo metatarso, causando dolore e limitazioni nella camminata [1].
- **Fascite plantare:** infiammazione del tessuto fibroso (fascia plantare) nella parte inferiore del piede, che provoca dolore al tallone e lungo l'arco del piede [9].
- **Neuroma di Morton:** ispessimento del tessuto nervoso tra le ossa del piede, solitamente tra il terzo e il quarto dito, causando dolore, formicolio e intorpidimento [11].
- **Tendinite del tendine d'Achille:** infiammazione del tendine d'Achille, che collega il muscolo del polpaccio al calcagno, provocando dolore e rigidità nella parte posteriore del tallone [5].

- **Frattura da stress:** piccole crepe nelle ossa del piede causate da ripetuti impatti o stress, che possono portare a dolore e gonfiore [13].
- **Artrite:** infiammazione delle articolazioni del piede, che può causare dolore, gonfiore e limitazione dei movimenti [5].
- **Piede diabetico:** una complicanza del diabete che può portare a ulcere, infezioni e, in casi gravi, amputazione del piede [11].
- **Piede piatto:** una condizione in cui l'arco del piede è appiattito o assente, causando dolore, stanchezza e instabilità durante la deambulazione [4].
- **Piede cavo:** una condizione in cui l'arco del piede è molto pronunciato, causando dolore, instabilità e possibili problemi di equilibrio [4].

La diagnosi e il trattamento precoce di queste patologie del piede possono aiutare a prevenire complicazioni a lungo termine e a mantenere una corretta funzione del piede. Queste patologie sono un problema comune che può interessare persone di tutte le età, indipendentemente dal sesso e dallo stile di vita. Possono essere sia acute che croniche e possono variare da lievi a gravi, a seconda della loro natura e della loro progressione. Queste condizioni possono limitare la capacità di movimento, causare dolore e, in alcuni casi, portare a disabilità permanente [10].

### 1.3.1 Patologie del piede: Il piede cavo

Il piede cavo è una condizione opposta al piede piatto, in cui l'arco plantare è particolarmente alto e accentuato. Questa situazione può essere il risultato di diversi fattori tra cui:

- **Anomalie congenite:** in alcuni casi, il piede cavo è presente sin dalla nascita a causa di anomalie genetiche o dello sviluppo [7].
- **Malattie neuromuscolari:** alcune condizioni neuromuscolari, come la neuropatia ereditaria o la distrofia muscolare, possono provocare un arco plantare eccessivamente alto a causa della debolezza o della rigidità dei muscoli del piede [11].

- **Lesioni traumatiche:** traumi al piede o alla gamba possono portare allo sviluppo di un piede cavo, specialmente se i legamenti, i tendini o i muscoli sono danneggiati in modo permanente [13].

Le persone affette da piede cavo possono sperimentare una serie di problemi, tra cui:

- **Dolore ai piedi:** la rigidità dell'arco plantare eccessivamente alto può causare dolore e affaticamento durante la camminata o la corsa [9].
- **Dolore alle ginocchia e alla schiena:** il piede cavo può influenzare l'equilibrio e la postura del corpo, portando a dolore e tensione nelle ginocchia e nella zona lombare [9].

Maggiore suscettibilità alle lesioni: a causa dell'arco plantare rigido e della ridotta capacità di assorbire gli impatti, il piede cavo è più soggetto a lesioni come distorsioni, tendiniti e fratture da stress [13].

Il trattamento del piede cavo dipende dalla causa sottostante e dalla gravità dei sintomi. Le opzioni di trattamento possono includere l'utilizzo di plantari ortopedici per distribuire meglio il peso e ammortizzare l'arco plantare, esercizi di fisioterapia per migliorare la flessibilità e la forza dei muscoli del piede, e, in alcuni casi, la chirurgia per correggere l'arco plantare o le strutture ossee del piede.

### 1.3.2 Patologie del piede: il piede piatto

Il piede piatto è una deformità caratterizzata dall'assenza o dalla riduzione dell'arco plantare, la curva che si forma sulla pianta del piede tra il tallone e la zona anteriore. Questa deformità può essere congenita o acquisita e può verificarsi in uno o entrambi i piedi. Il piede piatto congenito si verifica quando l'arco plantare non si forma completamente durante la crescita del bambino, mentre il piede piatto acquisito si verifica quando l'arco plantare si "abbassa" a causa di una lesione o dell'usura [4].



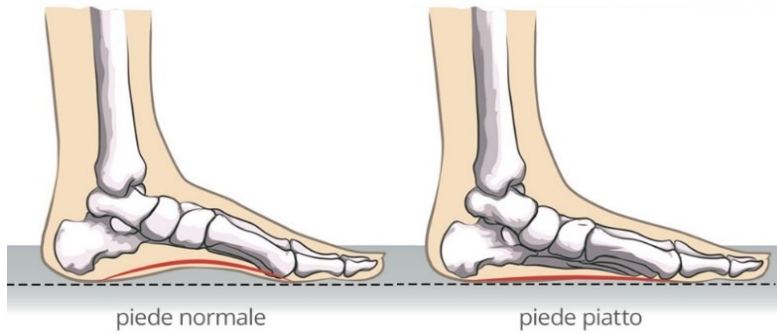


Figura 1.8: Differenze tra piede normale e piede piatto

## 1.4 Caratterizzazione del piede piatto

Il piede piatto è una condizione caratterizzata dalla riduzione o dalla mancanza totale dell'arco plantare, che porta all'appiattimento del piede e a una maggiore superficie di contatto con il suolo durante la deambulazione [3]. Anche se il piede piatto può essere presente fin dalla nascita, in alcuni casi si sviluppa durante l'età adulta a causa di vari fattori.

Questa condizione può causare dolore, affaticamento e difficoltà nella deambulazione o nella corsa, influenzando negativamente la qualità della vita dell'individuo [9]. Il piede piatto può anche aumentare il rischio di sviluppare altre patologie del piede, come la fascite plantare, l'osteoartrite e le tendiniti.

Il piede piatto è una condizione caratterizzata dall'appiattimento dell'arco longitudinale del piede, che può causare dolore e affaticamento durante la camminata. Può essere di natura congenita o acquisita e dipendere da diverse cause, tra cui:

- **Lassità legamentosa:** un allentamento dei legamenti che sostengono l'arco plantare può portare al collasso dell'arco stesso. Questo può essere dovuto a fattori genetici, invecchiamento, gravidanza o condizioni come la sindrome di Ehlers-Danlos, che colpisce il tessuto connettivo [11].
- **Trauma o lesioni:** fratture, distorsioni o altre lesioni del piede possono causare danni alle strutture di sostegno dell'arco plantare portando così allo sviluppo del piede piatto [12].

- **Malattie degenerative:** condizioni come l'artrite reumatoide o l'osteoartrite possono causare un deterioramento delle articolazioni e delle cartilagini del piede contribuendo alla formazione del piede piatto [14].
- **Sovrappeso e obesità:** il peso eccessivo può mettere un carico maggiore sulle strutture del piede causando l'affaticamento e il cedimento dell'arco plantare nel tempo [15].
- **Tendinite del tibiale posteriore:** la tendinite del tibiale posteriore è un'inflammazione del tendine che collega il muscolo tibiale posteriore all'osso navicolare del piede. Questa condizione può indebolire il sostegno dell'arco plantare, provocando il piede piatto [13].

La diagnosi del piede piatto viene effettuata mediante esame fisico e analisi della camminata del paziente. In alcuni casi possono essere necessari esami diagnostici come radiografia, risonanza magnetica o ecografia per confermare la presenza della condizione.

Il trattamento del piede piatto dipende dalla gravità della condizione e dalla presenza di sintomi. Le opzioni di trattamento non chirurgico includono:

- **Ortesi plantari:** solette personalizzate che sostengono l'arco plantare e aiutano a distribuire il peso in modo più uniforme [9].
- **Calzature appropriate:** scarpe con supporto adeguato per l'arco plantare e il tallone possono aiutare a ridurre il dolore e il disagio associati al piede piatto [9].
- **Fisioterapia:** esercizi di stretching e rafforzamento per i muscoli e i tendini del piede possono migliorare la stabilità e il supporto dell'arco plantare [9].
- **Farmaci:** analgesici e antinfiammatori possono essere utilizzati per alleviare il dolore e ridurre l'inflammazione associata al piede piatto [9].
- **Controllo del peso:** la perdita di peso, se necessaria, può ridurre il carico sulle strutture del piede e migliorare i sintomi del piede piatto [9].

Se le opzioni di trattamento conservativo non sono efficaci nel ridurre il dolore e i sintomi del piede piatto, la chirurgia può essere presa in considerazione. Le procedure chirurgiche per il piede piatto nell'adulto variano a seconda della causa e della gravità della condizione. Alcuni interventi comuni includono:

- **Ricostruzione dell'arco plantare:** questa procedura mira a ricostruire l'arco plantare attraverso il rinforzo dei legamenti e la correzione delle deformità ossee [5].
- **Osteotomia:** l'osteotomia consiste nel tagliare e riposizionare le ossa del piede per correggere l'arco plantare e migliorarne la stabilità [5].
- **Artrodesi:** l'artrodesi è una fusione chirurgica delle articolazioni del piede per bloccarle in una posizione corretta e stabile [5].
- **Intervento di Grice-Green:** questo intervento, oggetto della presente tesi, consiste nell'inserimento di un innesto osseo o sintetico nell'area dell'arco plantare per correggere la deformità e valutarne l'efficacia calcolando il volume prima e dopo l'operazione [5].

La scelta del trattamento più appropriato dipende dalla valutazione di diversi fattori, tra cui la gravità della condizione, l'età, la presenza di altre patologie e le esigenze individuali del paziente. La valutazione dell'efficacia degli interventi chirurgici, come proposto in questa tesi, può contribuire a migliorare le tecniche e le strategie terapeutiche per i pazienti affetti da piede piatto nell'adulto.

Il piede piatto è ovviamente anche di interesse per l'ingegneria biomeccanica, poiché una corretta postura e funzionamento del piede sono fondamentali per la locomozione umana. Gli ingegneri biomeccanici possono studiare le proprietà meccaniche del piede piatto e sviluppare nuove tecniche di riabilitazione e intervento chirurgico per migliorare la qualità della vita dei pazienti affetti da questa condizione.



*Figura 1.9: Paziente affetto da piede piatto acuto messo a confronto con un plantare*

## 1.4.1 I gradi di piattismo

Il piattismo del piede può essere classificato in quattro categorie, considerando anche il piede sano. Questa classificazione si basa sulla gravità della riduzione dell'arco plantare:

- **Piede sano (normale):** un piede sano presenta un arco plantare normale, che garantisce un adeguato supporto e distribuzione del peso durante la deambulazione. L'arco plantare di un piede sano funziona come un ammortizzatore, assorbendo gli impatti e adattandosi alle diverse superfici. Inoltre, un piede sano contribuisce a mantenere un allineamento corretto delle articolazioni degli arti inferiori, riducendo il rischio di problemi ortopedici [16].
- **Piede piatto di 1° grado (lieve):** presenta una riduzione lieve dell'arco plantare. In questa condizione, l'arco plantare è ancora presente, ma meno pronunciato rispetto a un piede sano. Il piede piatto di grado 1 può essere asintomatico e non richiedere un trattamento specifico, a meno che non causi dolore o disagio. Il trattamento può includere il supporto con ortesi plantari o calzature appropriate [2].
- **Piede piatto di 2° grado (moderato):** indica una riduzione moderata dell'arco plantare, con un appiattimento più evidente del piede. Questa condizione può causare dolore e alterazioni nella deambulazione, aumentando il rischio di problemi ortopedici correlati. Il trattamento del piede piatto di grado 2 può includere ortesi plantari, calzature adeguate, fisioterapia e, in alcuni casi, interventi chirurgici per migliorare il supporto dell'arco plantare [5].
- **Piede piatto di 3° grado (grave):** è caratterizzato dalla quasi totale assenza dell'arco plantare, con un marcato appiattimento del piede. Questa condizione può causare dolore significativo, limitazioni nella mobilità e problemi ortopedici a livello di ginocchia, fianchi e schiena. Il piede piatto di grado 3 richiede spesso un trattamento più aggressivo, che può includere ortesi plantari su misura, fisioterapia e interventi chirurgici per correggere la deformità e migliorare la funzione del piede [11].

La valutazione dei diversi gradi di piattismo è importante per determinare il trattamento più appropriato per ciascun paziente e monitorare l'evoluzione della condizione nel tempo. Nel contesto della presente tesi, la valutazione del volume dell'arco plantare può fornire informazioni preziose sulla gravità del piattismo e sull'efficacia degli interventi chirurgici.



Figura 1.10: L'appoggio del piede nei diversi gradi di piede piatto

## 1.4.2 Indicatori caratteristici del piede piatto

I segni distintivi del piede piatto sono numerosi e possono manifestarsi in diversi modi. Alcuni degli indicatori più comuni includono:

- **Riduzione dell'arco plantare:** il principale segno del piede piatto è l'appiattimento dell'arco longitudinale del piede, che può variare in gravità a seconda del grado di piattismo [6].
- **Pronazione del piede:** il piede piatto tende ad avere una pronazione eccessiva, ovvero la rotazione interna dell'arto inferiore che provoca l'appiattimento dell'arco plantare durante la camminata [2].
- **Eversione del tallone:** nei piedi piatti, il tallone può ruotare verso l'esterno causando un'angolazione e una distribuzione del peso non ottimale [16].
- **Aumento dell'ampiezza del passo:** a causa della pronazione e dell'eversione del tallone, il passo di una persona con piede piatto potrebbe essere più ampio del normale [16].

- **Instabilità della caviglia:** il piede piatto può causare instabilità alla caviglia aumentando il rischio di distorsioni e lesioni [11].
- **Incapacità di rimanere in punta di piedi:** le persone con piede piatto possono avere difficoltà a sollevarsi e a rimanere in punta di piedi a causa dell'indebolimento dell'arco plantare e della scarsa stabilità [16].
- **Dolore alle gambe e alla schiena:** il piede piatto può causare un'alterazione della biomeccanica dell'arto inferiore e della colonna vertebrale portando a dolore e affaticamento alle gambe e alla schiena [2, 11].

È importante notare che non tutti i pazienti con piede piatto presentano tutti questi indicatori e che la gravità dei sintomi può variare notevolmente da persona a persona. In ogni caso, la diagnosi del piede piatto dovrebbe essere effettuata da un professionista sanitario qualificato, dopo aver preso in considerazione l'insieme dei sintomi e delle caratteristiche del paziente.

### **1.4.3 Il trattamento chirurgico, l'intervento di Grice-Green**

L'intervento di Grice-Green è una procedura chirurgica utilizzata per correggere la deformità del piede piatto, in particolare nei casi di piede piatto. Questo intervento è indicato quando i trattamenti conservativi, come ortesi plantari e fisioterapia, non sono riusciti a fornire un sollievo adeguato dai sintomi e a migliorare la funzione del piede. L'intervento di Grice-Green è spesso utilizzato nei bambini e negli adolescenti, ma può essere applicato anche negli adulti con piede piatto[4].

La procedura di Grice-Green coinvolge l'inserimento di un innesto osseo o di un materiale sintetico nell'area dell'arco plantare [4], per correggere la deformità e migliorare il supporto dell'arco plantare. L'innesto viene posizionato all'interno di una tasca creata tra le ossa del meso-piede, solitamente tra il talo e lo scafoide, per aumentare la stabilità dell'arco plantare e ridistribuire il peso corporeo in modo più uniforme sul piede [11].

La scelta dell'innesto osseo o sintetico dipende dalle preferenze del chirurgo e dalle esigenze del paziente. L'innesto osseo può essere prelevato dallo stesso paziente (innesto autologo) o da un donatore (innesto allogenico). Gli innesti sintetici, invece, possono essere realizzati in materiali biocompatibili come il polimetilmetacrilato (PMMA) o l'idrossiapatite [12].

Dopo l'intervento di Grice-Green, il paziente può richiedere un periodo di immobilizzazione e riposo per permettere la guarigione delle strutture coinvolte e l'integrazione dell'innesto. In seguito, il paziente può iniziare un programma di riabilitazione che include fisioterapia e esercizi di rafforzamento per migliorare la funzione del piede e prevenire complicanze a lungo termine [11].

L'intervento di Grice-Green si è dimostrato efficace nel migliorare la postura, ridurre il dolore e prevenire ulteriori lesioni ai muscoli e alle articolazioni del piede. Tuttavia, come per qualsiasi intervento chirurgico, ci sono rischi associati, tra cui infezioni, problemi di guarigione ossea e la necessità di ulteriori interventi. È importante discutere con il proprio medico curante tutte le opzioni di trattamento disponibili e valutare attentamente i rischi e i benefici prima di procedere con la chirurgia [11].

Nel contesto della presente tesi, l'efficacia dell'intervento di Grice-Green viene valutata calcolando il volume dell'arco plantare prima e dopo l'operazione. Questo permette di quantificare l'effetto dell'intervento sulla deformità del piede piatto e di monitorare i risultati nel tempo [11].

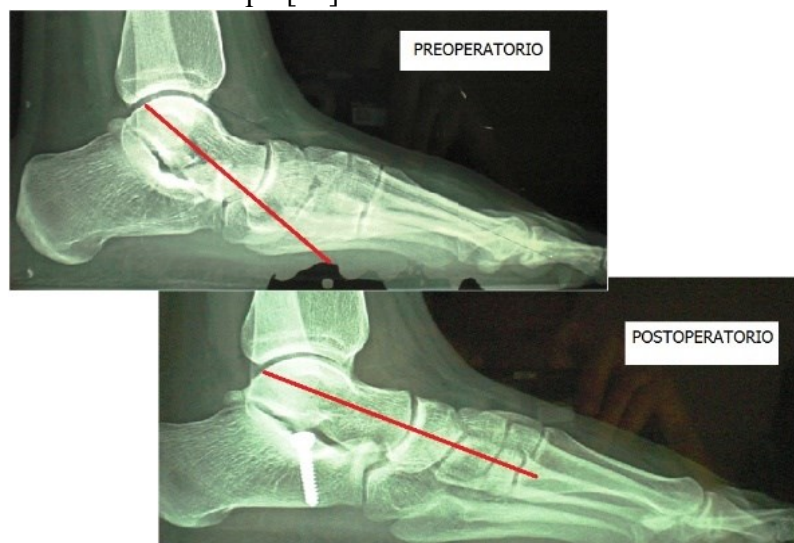


Figura 1.11: L'aumento significativo del volume e il riallineamento in asse delle ossa del piede a seguito dell'intervento di correzione.

## 1.4.4 Interventi possibili per la correzione d'arco

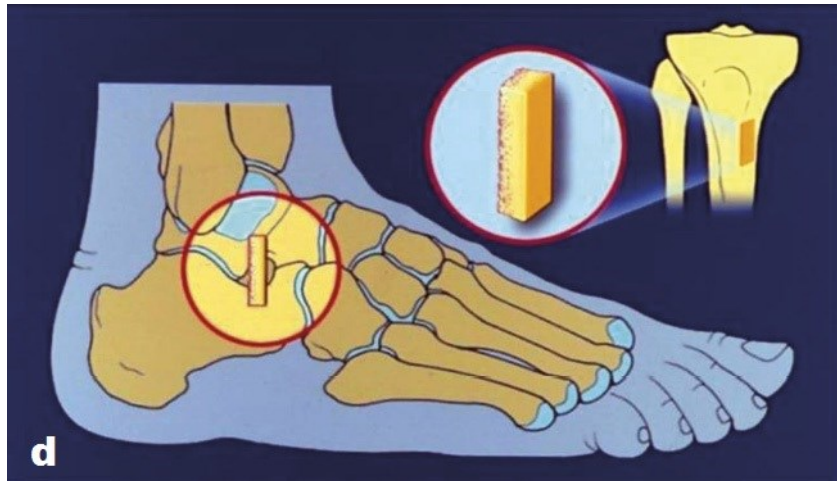
Oltre all'intervento di Grice-Green, esistono altre tecniche chirurgiche che possono essere utilizzate per correggere l'arco plantare del piede. La scelta della tecnica dipenderà dalla gravità del piede piatto, dall'età del paziente e dalla presenza di eventuali altre patologie. In generale, l'obiettivo dell'intervento è quello di ripristinare l'arco plantare del piede e migliorare la sua funzionalità [11].

Tra le tecniche chirurgiche utilizzate per la correzione dell'arco plantare del piede, si possono citare:

- **Osteotomia:** intervento che consiste nel tagliare e riposizionare l'osso per ripristinare l'arco plantare. Questa tecnica può essere utilizzata in caso di piede piatto flessibile [13].
- **Artrodesi:** intervento che consiste nella fusione delle articolazioni del piede. Questa tecnica può essere utilizzata in caso di piede piatto rigido [5].
- **Allungamento tendineo:** intervento che consiste nell'allungare i tendini del piede per ristabilire l'arco plantare. Questa tecnica può essere utilizzata in caso di piede piatto flessibile [4].
- **Innesto di cartilagine:** intervento che consiste nell'inserire cartilagine artificiale o prelevata dal paziente per ristabilire l'arco plantare. Questa tecnica può essere utilizzata in caso di piede piatto rigido [14].
- **Inserimento di un impianto di sostegno (calcaneo-stop):** intervento che consiste nell'inserire un impianto nella parte posteriore del calcagno per sostenere l'arco plantare. Questa tecnica può essere utilizzata in caso di piede piatto flessibile [3].



Prima di decidere di sottoporsi a un intervento chirurgico, è importante valutare attentamente i rischi e i benefici della procedura. Inoltre, è fondamentale seguire scrupolosamente le indicazioni del medico dopo l'intervento per garantire una corretta riabilitazione del piede e ottenere i migliori risultati possibili [11].



*Figura 1.12: Artrodesi correttiva a livello della sottoastraglica o della mediotarsica, immagine presa da una ricerca sulle patologie del piede dell'Istituto Ortopedico Rizzoli di Bologna.*

## CAPITOLO 2

### **Analisi e tecniche per la valutazione biomeccanica**

L'analisi biomeccanica è uno strumento essenziale per comprendere la dinamica del movimento e le forze che agiscono sul sistema muscolo-scheletrico. Nel contesto della valutazione del piede, l'analisi biomeccanica è utile per rilevare eventuali disfunzioni o squilibri muscolari e articolari che possono causare patologie.

In questo capitolo, verranno esaminate le principali tecniche di analisi biomeccanica impiegate nella valutazione del piede, focalizzandosi sulla valutazione della stabilità, dell'equilibrio e della forza muscolare [9].

#### **2.1 Analisi cinematica**

Per analizzare in modo dettagliato la posizione e il movimento del piede, è indispensabile utilizzare un sistema di coordinate tridimensionali. Tale sistema è formato da tre assi ortogonali: l'asse longitudinale (x), l'asse sagittale (y) e l'asse trasversale (z). L'asse x è parallelo alla superficie plantare, l'asse y è perpendicolare alla superficie plantare e parallelo al piano frontale, mentre l'asse z è perpendicolare alla superficie plantare e parallelo al piano trasversale.

Nell'ambito di questo sistema di riferimento, per descrivere la posizione e il movimento del piede è necessario ricorrere alle matrici di trasformazione. Una matrice di trasformazione è un insieme di valori numerici che rappresenta come le coordinate di un punto variano quando viene sottoposto a rotazione, traslazione o scala. Durante la valutazione biomeccanica del piede, le matrici di trasformazione sono impiegate per descrivere la posizione e il movimento delle ossa del piede rispetto a un sistema di riferimento fisso [6].

Nella valutazione biomeccanica del piede si utilizzano diverse matrici di trasformazione, tra cui la matrice di trasformazione di Rodrigues, la matrice di rotazione di Euler e la matrice di trasformazione omogenea. Ciascuna di queste

matrici di trasformazione ha specifiche applicazioni nell'ambito della valutazione biomeccanica del piede [6].

Inoltre, è importante sottolineare che i dati raccolti durante la valutazione biomeccanica del piede possono essere rappresentati in vari sistemi di riferimento, come il sistema di riferimento globale (World Coordinate System) o il sistema di riferimento locale (Local Coordinate System) dell'osso. La selezione del sistema di riferimento dipende dalle specifiche necessità dell'analisi biomeccanica e dalle preferenze del ricercatore [7].

L'adozione di un sistema di riferimento tridimensionale e di matrici di trasformazione è fondamentale per descrivere accuratamente la posizione e il movimento del piede nella valutazione biomeccanica. La scelta del sistema di riferimento e delle matrici di trasformazione è determinata dalle esigenze particolari dell'analisi biomeccanica e dalle preferenze del ricercatore [9].

## **2.2 Convenzioni articolari, giunto cardanico**

Nel campo della valutazione biomeccanica, le convenzioni cardaniche costituiscono un metodo significativo per descrivere il movimento tridimensionale di una struttura articolare come il piede e la caviglia in termini di angoli di rotazione attorno a tre assi ortogonali, cioè assi perpendicolari tra loro. Questo sistema di rappresentazione del movimento prende il nome dal matematico e ingegnere italiano Gerolamo Cardano, che introdusse il concetto del giunto cardanico nel XVI secolo.

Il giunto cardanico è costituito da due anelli concentrici e un terzo anello che collega i primi due. Gli anelli possono ruotare liberamente attorno ai propri assi. In biomeccanica, questo principio viene utilizzato per descrivere il movimento relativo tra due segmenti corporei, come il piede e la gamba, attorno a tre assi ortogonali.

Nella valutazione biomeccanica del piede, i tre angoli di rotazione utilizzati nel giunto cardanico sono:

- **Flessione dorsale (o plantare):** questo angolo descrive la rotazione del piede attorno all'asse trasversale, che è perpendicolare alla superficie plantare e parallelo al piano frontale. La flessione dorsale si riferisce al movimento del piede verso l'alto (verso la gamba), mentre la flessione plantare si riferisce al movimento del piede verso il basso (lontano dalla gamba).
- **Inversione/Eversione:** questo angolo descrive la rotazione del piede attorno all'asse longitudinale, che è parallelo alla superficie plantare e al piano sagittale. L'inversione si riferisce al movimento del piede verso l'interno (sul lato mediale), mentre l'eversione si riferisce al movimento del piede verso l'esterno (sul lato laterale).
- **Rotazione interna/esterna:** questo angolo descrive la rotazione del piede attorno all'asse sagittale, che è perpendicolare alla superficie plantare e parallelo al piano frontale. La rotazione interna si riferisce alla rotazione del piede verso l'interno (verso l'altro piede), mentre la rotazione esterna si riferisce alla rotazione del piede verso l'esterno (lontano dall'altro piede).

Le convenzioni cardaniche sono utilizzate per analizzare la mobilità articolare, determinare eventuali limitazioni nel movimento e identificare possibili cause di patologie del piede [6]. Inoltre, queste convenzioni sono fondamentali nella progettazione e nello sviluppo di protesi e ortesi per il piede, nonché nella pianificazione di interventi chirurgici e strategie terapeutiche [7].

L'uso del giunto cardanico per descrivere il movimento delle articolazioni presenta tuttavia alcune limitazioni.

È importante sottolineare che la rotazione cardanica segue una sequenza fissa per gli assi ortogonali, il che introduce un potenziale errore d'angolo, conosciuto come l'errore di **Gimbal Lock** [9]. Quest'ultimo si verifica quando due degli assi del giunto cardanico si allineano, portando alla perdita di un grado di libertà e compromettendo così la capacità di descrivere con precisione il movimento articolare. Questo fenomeno è particolarmente rilevante in situazioni dove l'orientamento preciso è cruciale, come nella navigazione o nella robotica [9]. L'errore di Gimbal Lock può causare un'imprecisa interpretazione del movimento

reale, portando a diagnosi errate o alla non ottimale progettazione di dispositivi biomeccanici.

## 2.3 La convenzione di Grood e Suntay

Per superare queste limitazioni, nel 1983 Grood e Suntay introdussero una nuova convenzione che prende il nome dai suoi creatori, per descrivere il movimento tridimensionale delle articolazioni. Questo approccio utilizza sistemi di coordinate locali per ciascun osso dell'articolazione e definisce gli angoli di rotazione attraverso gli angoli di Eulero, offrendo una descrizione precisa del movimento articolare senza i limiti imposti dal blocco di Gimbal [1].

La convenzione distingue tra un sistema di riferimento locale, specifico per ogni osso, e un sistema di riferimento globale, indipendente dall'articolazione, consentendo un'analisi dettagliata e accurata del movimento. La sequenza di rotazioni, basata sugli assi ortogonali del sistema di riferimento locale, viene adattata alle specificità anatomiche e funzionali dell'articolazione esaminata, garantendo flessibilità e precisione nell'analisi [1].

Una delle virtù principali della convenzione di Grood e Suntay è la sua capacità di minimizzare l'errore d'angolo, un vantaggio cruciale derivante dall'uso degli angoli di Eulero. Questi angoli permettono di evitare l'allineamento degli assi che causano il blocco di Gimbal, assicurando così una rappresentazione più fedele del movimento articolare. In pratica, il metodo mantiene una separazione chiara tra i tre assi di rotazione, prevenendo la sovrapposizione e consentendo un'analisi dettagliata dei movimenti articolari, anche quelli più complessi [5].

In parole semplici, la convenzione di Grood e Suntay utilizza due sistemi di riferimento (coordinate) per ciascuna delle ossa che formano un'articolazione. Immaginiamo che ogni osso abbia una sorta di "etichetta" che indica la sua posizione e orientamento nello spazio. Questi sistemi di coordinate aiutano a descrivere come le ossa si muovono e ruotano l'una rispetto all'altra durante il movimento

Questo suo sistema di riferimento lo rende preferibile rispetto all'uso del giunto cardanico semplice. Vediamo alcune delle principali ragioni:

- **Precisione e dettaglio:** la convenzione di Grood e Suntay permette di analizzare accuratamente il movimento articolare, fornendo una descrizione dettagliata e quantitativa delle rotazioni su ciascun asse del sistema di riferimento locale. Questa precisione è fondamentale per identificare eventuali anomalie o disfunzioni articolari e per monitorare i progressi nel tempo.
- **Adattabilità alle articolazioni complesse:** a differenza del giunto cardanico semplice, la convenzione di Grood e Suntay è stata sviluppata specificamente per l'analisi delle articolazioni complesse, come il ginocchio, la spalla e la caviglia. La convenzione tiene conto delle caratteristiche anatomiche e funzionali di queste articolazioni, rendendola più adatta per la valutazione biomeccanica.
- **Integrazione con altre convenzioni di analisi biomeccanica:** la convenzione di Grood e Suntay è compatibile e può essere integrato con altre convenzioni di analisi biomeccanica, come l'analisi del movimento basata su videoregistrazione o l'analisi delle forze e delle pressioni durante il cammino. Questa compatibilità consente una valutazione biomeccanica più completa e approfondita delle articolazioni.
- **Flessibilità:** La convenzione di Grood e Suntay può essere adattata e modificata in base alle esigenze specifiche della ricerca o della pratica clinica. Ciò consente ai ricercatori e ai clinici di personalizzare l'analisi in base alle caratteristiche anatomiche e funzionali delle articolazioni e alle esigenze dei pazienti.

La rappresentazione matematica degli angoli di Eulero può essere espressa come segue:

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = R_z(\gamma) * R_y(\beta) * R_x(\alpha)$$

dove  $R_z(\gamma), R_y(\beta), R_x(\alpha)$  rappresentano le matrici di rotazione intorno agli assi  $z, y, x$  rispettivamente, e  $\alpha, \beta, \gamma$  invece sono gli angoli di rotazione attorno agli assi corrispondenti [6].

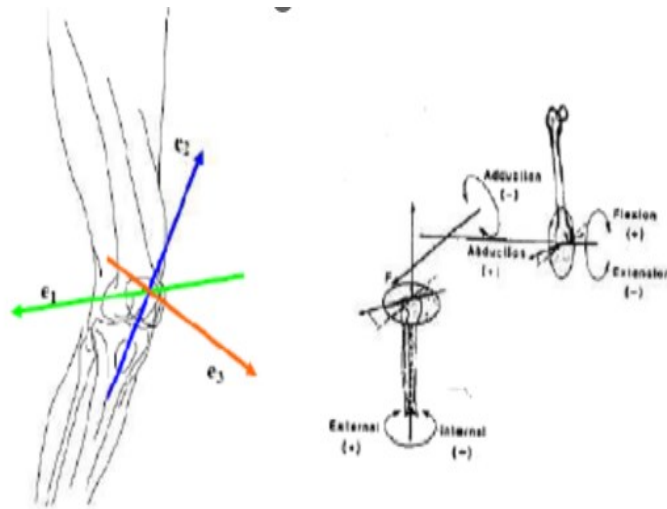


Figura 2.1: Terna articolare di Grood e Suntay: con  $e_1, e_2, e_3$  si indicano, rispettivamente, l'asse medio-laterale del femore, attorno a cui avviene la flessione-estensione, l'asse prossimo-distale della tibia, attorno a cui avviene la rotazione interna-est

## 2.4 Analisi del cammino

La forza di reazione al suolo rappresenta la forza esercitata dal suolo sul piede durante la locomozione. Tale forza può essere scomposta in tre componenti: la componente verticale, la componente antero-posteriore e la componente laterale. La componente verticale sostiene il peso del corpo, mentre le componenti antero-posteriore e laterale sono responsabili della propulsione e della stabilizzazione durante il cammino [7].

L'analisi della forza di reazione al suolo può offrire informazioni riguardo la distribuzione delle forze durante la locomozione e la presenza di eventuali asimmetrie o anomalie nel modo in cui tali forze vengono distribuite [3]. Questi dati possono essere impiegati nella progettazione di dispositivi di assistenza alla deambulazione o per valutare l'efficacia di un intervento riabilitativo.

I dati derivanti dall'analisi della forza di reazione al suolo possono essere utilizzati per progettare e ottimizzare dispositivi di assistenza alla deambulazione, come ad esempio protesi e ortesi al fine di migliorare la qualità della vita dei pazienti [13]. L'analisi delle forze di reazione al suolo può essere impiegata per monitorare e valutare l'efficacia di interventi riabilitativi, permettendo ai professionisti del settore di adattare e personalizzare i trattamenti in base alle esigenze specifiche di ogni paziente [15].

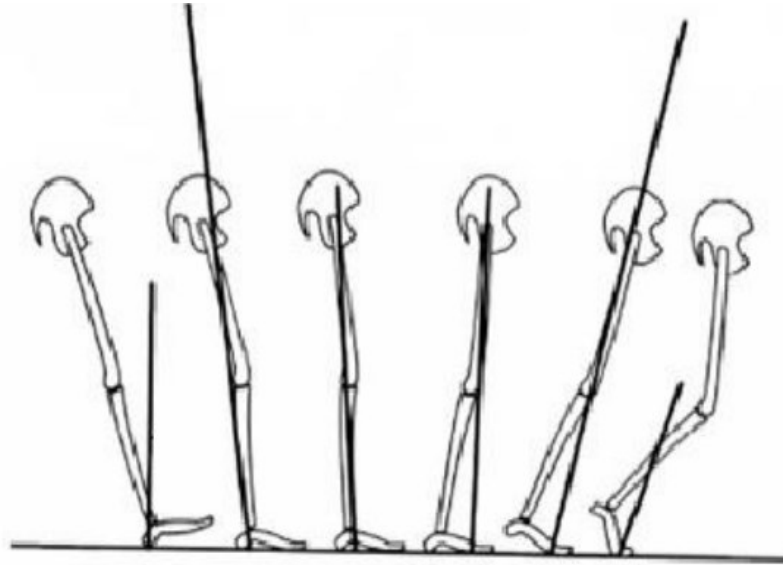


Figura 2.2: Rappresentazione dei diversi vettori di forza generati dalla reazione con il suolo

## 2.4.1 Biomeccanica del piede sano

Nell'ambito dell'ingegneria biomedica, l'analisi della curva di forza, ovvero della forza di reazione al suolo, è fondamentale per lo studio del cammino umano [7]. La curva di forza rappresenta la forza esercitata dal suolo sulla superficie plantare del piede durante la fase di appoggio [6].

La complessità della meccanica del contatto tra il piede e il suolo dipende da diversi fattori, tra cui la velocità di cammino, il tipo di superficie del terreno, l'andatura del soggetto e la conformazione del piede stesso.

Durante la fase di appoggio del piede, le curve di forza normali presentano un andamento caratteristico, che inizia con un picco di forza associato all'impatto del



tallone sul suolo, seguito da una fase di roll-over in cui la forza diminuisce gradualmente fino al picco di spinta, che rappresenta il massimo sforzo muscolare per la propulsione del passo successivo. Tuttavia, in presenza di patologie del piede o disfunzioni biomeccaniche, la curva di forza può mostrare andamenti anomali, come una riduzione del picco di spinta o una diminuzione della fase di roll-over [8].

La rilevazione di tali anomalie nelle curve di forza è cruciale per identificare potenziali patologie del piede o andature disfunzionali perché forniscono informazioni preziose per una diagnosi accurata e per la pianificazione di un intervento terapeutico adeguato. Nell'ambito dell'ingegneria biomedica, l'analisi della curva di forza, ovvero della forza di reazione al suolo, è fondamentale per lo studio del cammino umano. La curva di forza rappresenta la forza esercitata dal suolo sulla superficie plantare del piede durante la fase di appoggio.

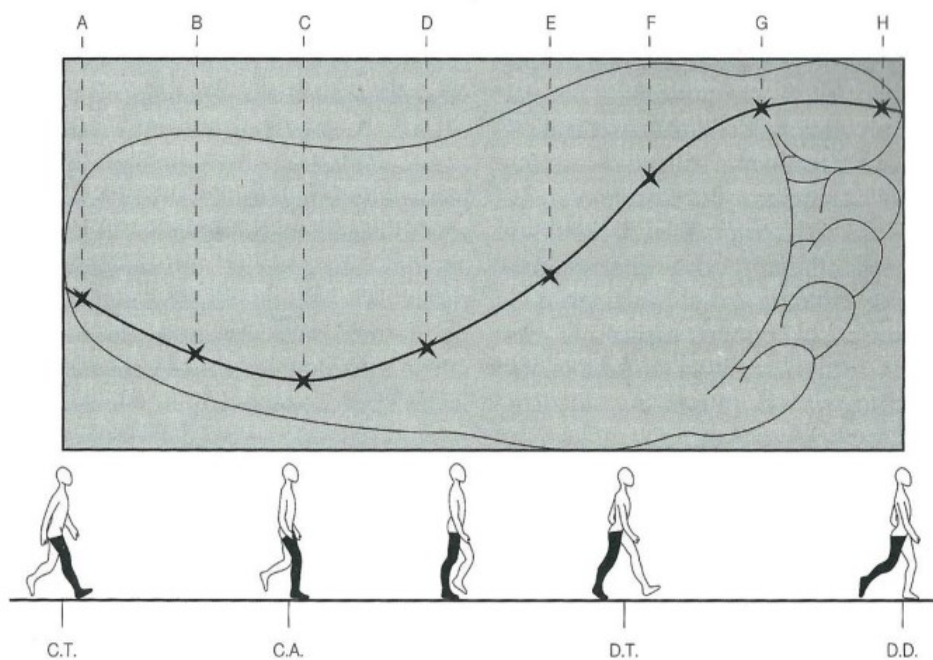


Figura 2.3: Curve di forza nella fase di appoggio di un piede sano

## 2.4.2 Biomeccanica del piede piatto

Le anomalie nelle curve di forza possono essere correlate a diverse patologie del piede, tra cui il piede piatto [2], il piede cavo, l'alluce valgo, l'iperpronazione e l'ipersupinazione. In presenza di queste condizioni, le curve di forza, come già detto, mostrano deviazioni rispetto all'andamento normale, con riduzioni o aumenti dei picchi di forza o variazioni nella fase di roll-over [3].

L'analisi delle curve di forza anormali è utile per valutare l'efficacia di interventi terapeutici [11], come l'utilizzo di plantari ortopedici o l'implementazione di programmi di potenziamento muscolare specifici. Inoltre, l'individuazione delle anomalie nelle curve di forza può contribuire alla prevenzione di lesioni del piede e degli arti inferiori, in particolare negli atleti o nelle persone che praticano attività fisica intensa [15].

Questo approccio consente di progettare dispositivi e interventi in grado di migliorare la qualità della deambulazione, ridurre il dolore e prevenire ulteriori complicazioni o lesioni associate alle patologie del piede [1].

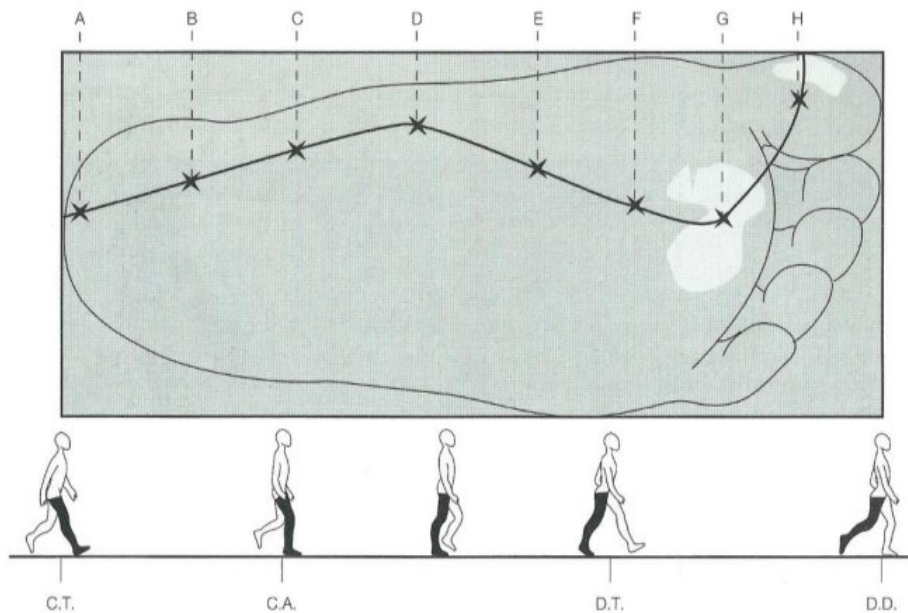


Figura 2.4: Curve di forza in un piede piatto

## 2.5 Tecniche di valutazione standard

Le tecniche di valutazione in biomeccanica del piede si classificano in invasive e non invasive, essenziali per acquisire dati precisi sul funzionamento del piede e della locomozione [16].

Le tecniche non invasive non comportano interventi diretti sul corpo e sono prive di dolore o necessità di recupero [3]. L'analisi del cammino, ad esempio, utilizza sistemi avanzati per raccogliere dati sulla cinematica e la cinetica senza contatto fisico. I parametri spazio-temporali del cammino, come lunghezza e velocità del passo, tempo di contatto con il suolo e ampiezza del passo, rientrano in questa categoria, offrendo insight preziosi sulla meccanica della locomozione in maniera invasiva [7].

Al contrario, le tecniche invasive implicano un qualche grado di intervento fisico, come prelievi di tessuto o iniezioni, e sono utilizzate meno frequentemente nella biomeccanica del piede a causa della loro natura intrusiva e dei potenziali rischi associati [5].

L'importanza dei parametri spazio-temporali del cammino è cruciale in quanto forniscono dati quantitativi sulla dinamica del passo, essenziali per analizzare la normale funzione del piede e identificare possibili anomalie biomeccaniche o patologiche [6]. La scelta tra tecniche invasive e non invasive dipende dall'obiettivo dello studio, dalla necessità di dettaglio nelle informazioni e dalla

priorità di minimizzare il disagio per il paziente, privilegiando spesso metodi non invasivi per il loro equilibrio tra efficacia e comfort [2].

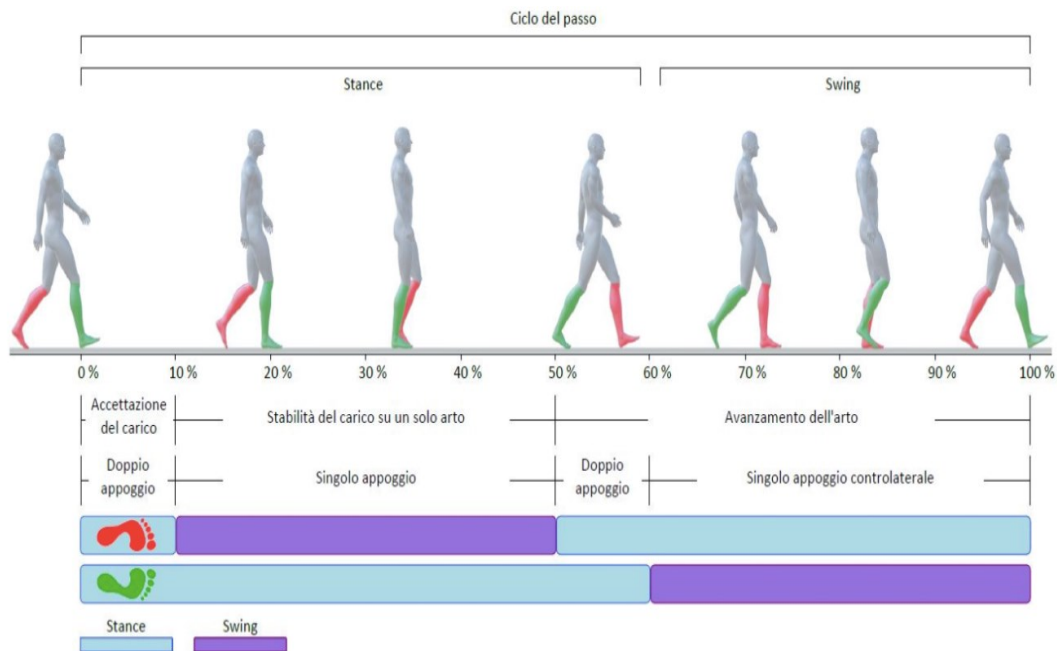


Figura 2.5: I parametri spazio-temporali del cammino

## 2.5.1 Pedana baropodometrica

La pedana baropodometrica è uno strumento diagnostico impiegato per analizzare la distribuzione delle pressioni plantari durante le diverse fasi del cammino [3]. La pedana è composta da una matrice di sensori ad alta sensibilità che rilevano e quantificano la pressione esercitata dal piede al momento dell'appoggio e durante l'intero ciclo del passo.

La pedana baropodometrica riveste un ruolo cruciale nell'identificazione di anomalie nella distribuzione delle pressioni plantari, che possono essere sintomatiche di patologie del piede, disfunzioni biomeccaniche o problematiche posturali [10]. L'analisi dei dati ottenuti dalla pedana può guidare la diagnosi e la pianificazione di interventi terapeutici appropriati.

Sebbene sia fondamentale per rilevare anomalie posturali o biomeccaniche, questo strumento diagnostico presenta alcuni svantaggi. Uno dei limiti principali è che la pedana fornisce dati solo sulle forze esercitate sul piano orizzontale, non offrendo informazioni sulle componenti verticali o laterali delle forze che agiscono sul piede [9]. Inoltre, l'ambiente controllato e la consapevolezza di essere osservati possono influenzare il modo in cui i pazienti camminano, introducendo potenziali distorsioni nei risultati, che potrebbero, quindi, non riflettere fedelmente il cammino naturale del paziente [11].

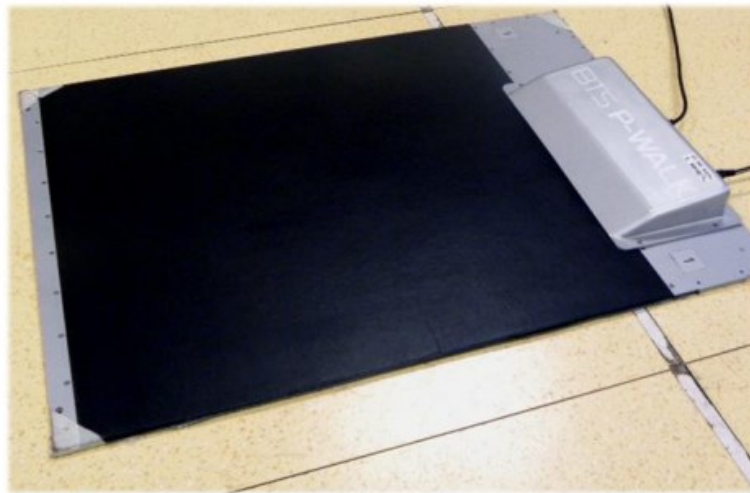


Figura 2.6: Pedana baropodometrica

## 2.5.2 Scanner 3-D

Lo scanner 3-D è uno strumento tecnologico impiegato per acquisire una rappresentazione tridimensionale accurata del piede [16]. Questa metodologia permette di analizzare la forma, le dimensioni e la morfologia del piede, facilitando l'individuazione di eventuali deformità, asimmetrie o anomalie strutturali.

Lo scanner 3-D viene principalmente utilizzato nella progettazione e realizzazione di protesi e ortesi personalizzate, garantendo un adattamento ottimale alle specifiche esigenze del paziente e un miglioramento della funzionalità e del comfort [11]. Tuttavia, la tecnologia può risultare utile anche nell'ambito della valutazione di patologie del piede, nella pianificazione di interventi chirurgici e nella progettazione di calzature su misura.

Sebbene lo scanner 3-D sia fondamentale nella creazione di protesi, ortesi e calzature personalizzate, esso presenta alcuni svantaggi, primo tra questi è quello di non fornire informazioni sulle funzioni dinamiche del piede o su come le forze sono distribuite e applicate durante il movimento, elementi vitali nella valutazione biomeccanica completa del cammino [9]. Inoltre, lo scanner 3-D è limitato dalla staticità della scansione che potrebbe non riflettere accuratamente le condizioni reali di carico del piede, limitando la capacità di valutare come le strutture del piede si comportano sotto stress o durante il movimento.



*Figura 2.7: Scanner 3D plantare mentre esegue una scansione su paziente*

### **2.5.3 Tomografia assiale computerizzata standard**

La Tomografia Computerizzata Assiale (TAC) è una tecnica diagnostica avanzata che offre immagini ad alta risoluzione delle strutture interne del corpo, comprese quelle del piede, utili per identificare fratture, lussazioni e altre patologie [12]. Questo metodo si basa sull'uso di raggi X per generare dettagliate rappresentazioni ossee del piede e delle sue articolazioni, supportando la diagnosi, la pianificazione chirurgica e la progettazione di dispositivi ortopedici.

Durante l'esame, il paziente viene posizionato su un lettino che scorre all'interno di un anello aperto contenente il generatore di raggi X e i rilevatori di raggi X [16]. Mentre il lettino si muove all'interno dell'anello, il generatore emette fasci di raggi X che attraversano il piede del paziente. I rilevatori di raggi X captano la quantità di radiazioni che attraversano il piede e inviano queste informazioni a un computer che le elabora per creare immagini dettagliate del piede.

Nonostante i suoi punti di forza, la TAC ha limitazioni significative. Un aspetto critico è che le scansioni vengono eseguite con il piede non in carico, il che non permette di osservare le strutture del piede sotto il peso del corpo o durante il movimento, limitando la capacità di valutare la biomeccanica del piede in condizioni reali.

In aggiunta, l'esposizione a radiazioni ionizzanti rappresenta un rischio per la salute, potenzialmente implicato nello sviluppo di condizioni a lungo termine come i tumori. La TAC può inoltre essere costosa e talvolta richiede l'uso di un mezzo di contrasto che potrebbe causare reazioni allergiche.

Dato il suo utilizzo di radiazioni e la mancanza di valutazione in condizioni di carico, l'impiego della TAC dovrebbe essere attentamente valutata, riservandola a casi in cui le informazioni che fornisce sono essenziali e non ottenibili con metodi meno invasivi, assicurando che i benefici giustifichino i rischi associati.



Figura 2.8: La classica TAC (tomografia computerizzata assiale)

## **2.5.4 La Cone Beam Computer Tomography (CBCT)**

La Cone Beam Computed Tomography (CBCT) rappresenta una tecnologia di punta nelle indagini di ricostruzione morfologica del piede, adottata per la sua avanzata capacità di generare immagini tridimensionali ad alta risoluzione mediante una sorgente di raggi X a fascio conico [13]. Presso l'Istituto Ortopedico Rizzoli di Bologna, questa macchina è stata scelta per la sua efficacia nel catturare dettagli fini del piede, velocizzando il processo di acquisizione e minimizzando l'esposizione alle radiazioni rispetto alla TAC convenzionale.

La scelta di usare la CBCT si basa sulla sua precisione diagnostica e sulla sua capacità tecnologica avanzata. Questa tecnologia, con i suoi 3 detettori, assicura una cattura dell'immagine ottimale, riducendo la dispersione delle immagini e aumentando la chiarezza. L'emissione ad impulsi del fascio di raggi X, unita ad un sistema di raffreddamento efficiente, garantisce la qualità dell'immagine e la sicurezza del dispositivo durante l'utilizzo prolungato. Tale apparecchiatura è fondamentale per valutare deformità ossee e articolari, pianificare interventi chirurgici e verificare l'efficacia dei trattamenti. Attraverso software specializzati, le immagini prodotte dalla CBCT possono essere accuratamente analizzate per segmentare e quantificare le deformità, particolarmente a quelle della volta plantare, facilitando così la progettazione di trattamenti correttivi personalizzati [13].

L'impiego della CBCT si estende alla creazione di immagini dettagliate mediante la raccolta di proiezioni 2D in vari angoli, che vengono poi elaborate in un modello 3D attraverso un processo di retroproiezione filtrata, basato sul modello matematico di Radon. Questa metodologia consente di attribuire a ogni punto dell'immagine un valore specifico di attenuazione, migliorando notevolmente l'accuratezza diagnostica.



Rispetto ad altre metodologie come la CT e la MRI, la CBCT offre vantaggi significativi in termini di costo, tempo di acquisizione e risoluzione spaziale, rendendolo uno strumento insostituibile per l'analisi approfondita e il trattamento delle patologie del piede nell'ambito della pratica clinica ortopedica.



*Figura 2.9: Paziente che utilizza la CBCT presente all'Ospedale Ortopedico Rizzoli di Bologna, sul piede destro con carico*

## CAPITOLO 3

### **Tecniche innovative per la valutazione 3D della deformità della volta plantare**

La valutazione dettagliata della deformità della volta plantare si avvale di tecniche innovative e materiali specifici per ottenere una rappresentazione accurata e tridimensionale. La Cone Beam CT (CBCT) è fondamentale in questo contesto, offrendo immagini 3D ad alta risoluzione grazie all'uso di raggi X a fascio conico [16], permettendo una visione dettagliata della struttura del piede.

Accanto alla CBCT, la segmentazione delle immagini biomedicali emerge come una tecnica cruciale per l'analisi morfologica del piede, isolando aree specifiche per un esame approfondito [13]. Questa segmentazione, che può essere effettuata sia manualmente sia attraverso algoritmi avanzati, facilita l'identificazione precisa delle aree affette da deformità.

Per garantire la coerenza e l'accuratezza delle analisi, è imprescindibile adottare un protocollo di valutazione standardizzato che includa non solo l'acquisizione e la segmentazione delle immagini, ma anche l'analisi dettagliata delle forme, delle dimensioni e delle variazioni morfologiche della volta plantare [11]. Questo approccio consente di quantificare le deformità e di stabilire il corso d'intervento più adeguato.

Nella pratica clinica, l'utilizzo di materiali come silicone, resine acriliche, gesso e polimeri termoplastici è diffuso per la creazione di modelli fisici del piede, che servono poi per la produzione di plantari ortopedici personalizzati [14]. La selezione del materiale adeguato è determinata dalle specifiche esigenze del paziente, garantendo così un adattamento ottimale e un supporto efficace.

Queste tecniche innovative, combinate con l'uso di materiali adatti e un rigoroso protocollo di valutazione, rappresentano la frontiera nell'analisi e nel trattamento delle deformità della volta plantare, offrendo soluzioni personalizzate che mirano al miglioramento della qualità della vita dei pazienti.

### 3.1 OnSight 3D extremity system, Carestream

Il sistema OnSight 3D Extremity di Carestream rappresenta un'avanzata soluzione tecnologica nel campo della diagnostica radiologica, specializzata per gli arti inferiori, inclusi piedi e caviglie, grazie all'impiego della tecnologia Cone Beam CT (CBCT) [16]. Questo sistema si distingue per l'uso di un sensore a pannello piatto unico e un braccio a forma di C che circonda l'arto in esame, catturando immagini radiologiche tridimensionali con precisione e velocità.

Le immagini ottenute con il sistema OnSight sono di alta qualità e dettaglio, grazie a dosi di radiazione ridotte e tempi di scansione brevi, migliorando l'esperienza del paziente e la sicurezza dell'esame. La tecnologia CBCT acquisisce un insieme di immagini radiologiche che, attraverso complessi algoritmi di filtraggio e ricostruzione, vengono trasformate in un modello volumetrico 3D. Questi algoritmi elaborano i dati raccolti per determinare la densità radiologica in ogni punto, offrendo una visione dettagliata della struttura interna dell'arto.

Il software associato al sistema OnSight consente un'analisi approfondita del volume ricostruito, facilitando la misurazione di deformità specifiche come quelle della volta plantare. Inoltre, la capacità di segmentazione automatica del software distingue le varie strutture anatomiche, consentendo un'analisi precisa di osso e tessuti molli. Rispetto ad altre modalità di imaging come la tomografia computerizzata (TC) e la risonanza magnetica nucleare (RMN), il sistema OnSight



Fig 3.1: Dispositivo OnSight 3D Extremity System della Carestream

3D Extremity si specializza nell'analisi degli arti inferiori, fornendo un dettaglio senza precedenti sulla struttura ossea e sui tessuti molli del piede e della caviglia. In conclusione, il sistema OnSight 3D Extremity di Carestream non solo migliora significativamente la capacità diagnostica per le patologie dell'arto inferiore ma offre anche una metodologia efficiente e sicura per la valutazione e la quantificazione delle deformità plantari.

## 3.2 Segmentazione delle immagini biomedicali

La segmentazione delle immagini biomedicali gioca un ruolo fondamentale nella ricostruzione morfologica e nella valutazione dettagliata delle deformità della volta plantare. Attraverso la segmentazione, è possibile isolare e analizzare specifiche strutture anatomiche, come le ossa del piede, facilitando la creazione di modelli tridimensionali per approfondimenti biomeccanici.

Esistono diverse metodologie per la segmentazione, ognuna con i propri vantaggi e limitazioni:

- **Modalità manuale:** in questa modalità, l'operatore identifica manualmente le aree di interesse utilizzando strumenti di disegno. Sebbene questa tecnica offra un'elevata precisione, è laboriosa e richiede un impegno considerevole, risultando meno efficiente per l'analisi di ampi set di dati.
- **Modalità automatica:** gli algoritmi software eseguono autonomamente la segmentazione, garantendo rapidità. Tuttavia, l'efficacia di questa modalità dipende strettamente dalla qualità delle immagini e dalla complessità delle strutture analizzate.
- **Modalità semi-automatica:** unisce la precisione dell'intervento umano con l'efficienza dell'automazione. L'operatore fornisce indicazioni iniziali che guidano l'algoritmo, bilanciando velocità e accuratezza.

All'Istituto Ortopedico Rizzoli di Bologna, adottiamo il programma MIMICS (Materialise Interactive Medical Image Control System) per la segmentazione delle immagini, preferendolo ad altri software grazie alla sua avanzata capacità di segmentazione semi-automatica. MIMICS eccelle nell'identificare i bordi e nel crescere le regioni a partire da punti seed, facilitando la creazione di modelli 3D

accurati. Questa precisione è particolarmente preziosa per modellare strutture complesse come quelle ossee, consentendo un'analisi biomeccanica più accurata e dettagliata.

### **3.2.1 Segmentazione delle strutture ossee (mimics)**

La segmentazione delle immagini biomedicali è essenziale per estrarre informazioni critiche relative alle strutture ossee, permettendo di fornire un modello tridimensionale dettagliato della forma e densità ossea. Questo processo, che richiede l'impiego di algoritmi sofisticati, si avvale di varie tecniche come la segmentazione basata sulla soglia, sulla regione e sul contorno. Ogni tecnica ha le sue peculiarità: quella basata sulla soglia separa i pixel in base all'intensità, la segmentazione regionale raggruppa pixel simili, e la tecnica basata sul contorno identifica i bordi delle strutture ossee.

Tra i software disponibili per la segmentazione ossea, Mimics di Materialise si distingue per la sua capacità di combinare queste tecniche, offrendo un'approccio semi-automatico che massimizza accuratezza e efficienza. Questo software si rivela particolarmente potente nel contesto clinico dell'Istituto Ortopedico Rizzoli di Bologna, dove viene impiegato per affrontare la complessità della segmentazione delle strutture ossee del piede. Mimics permette agli utenti di importare immagini, effettuare la pre-elaborazione per ridurre il rumore, e applicare algoritmi avanzati di segmentazione per isolare e analizzare le regioni d'interesse.

Il processo di segmentazione in Mimics è interattivo e consente modifiche dettagliate per eliminare artefatti e ottimizzare i modelli 3D. Questi modelli possono poi essere convertiti in formati CAD per la progettazione di protesi personalizzate o per la pianificazione chirurgica. L'efficacia di Mimics risiede nella sua precisione e nella sua capacità di integrare vari metodi di segmentazione, rendendolo superiore ad altri software, specialmente in termini di flessibilità e dettaglio dei modelli ottenuti.

La segmentazione avanzata offerta da Mimics è cruciale non solo per la pratica clinica ma anche per la ricerca e la formazione medica. I modelli tridimensionali generati sono fondamentali per analizzare le deformità ossee, sviluppare nuove terapie e formare medici e chirurghi. Inoltre, l'evoluzione dell'intelligenza artificiale e del machine learning promette di potenziare ulteriormente la segmentazione, incorporando algoritmi di apprendimento profondo che potrebbero rivoluzionare l'accuratezza e la velocità di questo processo essenziale nella diagnostica medica moderna.

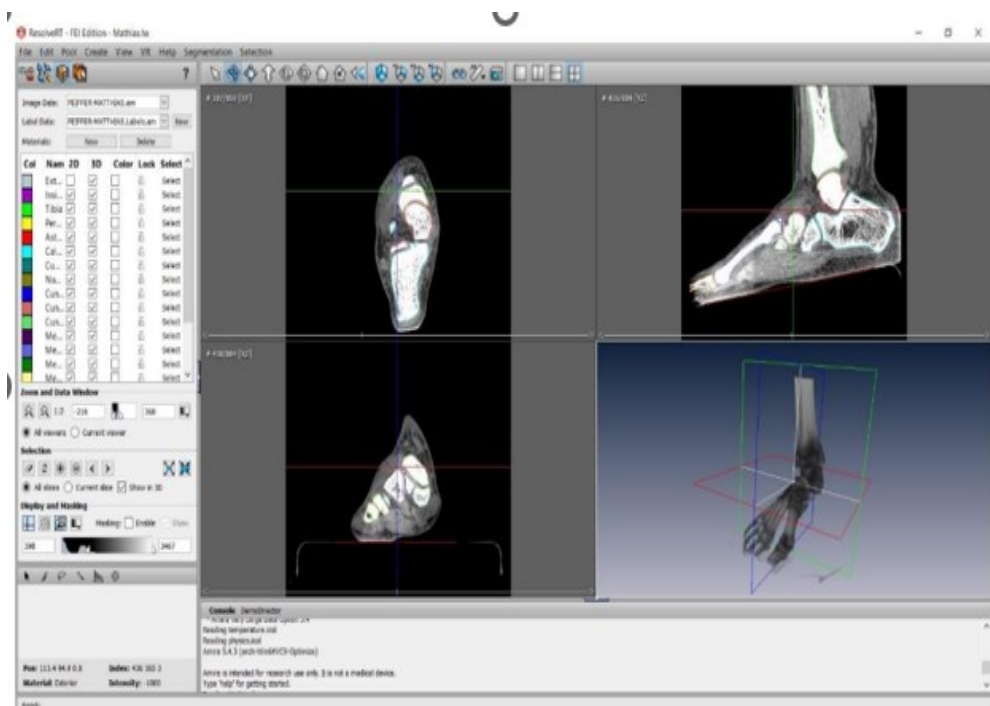


Fig 3.2: Segmentazione delle ossa con Editor MIMICS

### 3.3 Protocollo di valutazione

La valutazione del volume della pianta del piede è un'importante applicazione nella ricerca biomedica e nella pratica clinica. La procedura per la valutazione del volume arcoplantare è complessa e richiede l'uso di attrezzature sofisticate e software avanzati. In questo capitolo, verrà presentato il protocollo di valutazione utilizzato in questa ricerca per quantificare il volume della pianta del piede pre e post operazione.

Il protocollo di valutazione è composto dalle seguenti fasi:

- **Acquisizione delle immagini:** le immagini sono acquisite utilizzando una CBCT su pazienti affetti da patologie ai piedi, sia pre che post intervento chirurgico.
- **Segmentazione delle immagini:** la segmentazione è un'operazione critica che consente di estrarre le strutture di interesse dalle immagini mediche. La segmentazione del piede viene effettuata utilizzando software di elaborazione delle immagini come Mimics Research.
- **Creazione del modello CAD:** una volta ottenuta la segmentazione, viene creato il modello CAD del piede che consente di visualizzare le informazioni anatomiche in modo preciso e accurato.
- **Calcolo del volume arcoplantare:** il volume della pianta del piede viene calcolato utilizzando il software di analisi delle immagini, che permette di effettuare la misura del volume in modo automatizzato. La differenza di volume tra pre e post intervento chirurgico viene poi calcolata al fine di valutare l'efficacia dell'operazione di correzione dell'arco.
- **Analisi statistica:** i dati ottenuti vengono analizzati mediante l'utilizzo di tecniche statistiche appropriate al fine di determinare la significatività della differenza di volume pre e post operazione.

Il protocollo di valutazione descritto rappresenta una metodologia standard per la valutazione del volume arcoplantare in pazienti con patologie ai piedi. L'uso di questa metodologia può consentire di ottenere risultati affidabili e ripetibili, che possono essere utilizzati nella pratica clinica per valutare l'efficacia dei trattamenti chirurgici e per la ricerca in campo biomeccanico.

### 3.4 Acquisizione e valutazione dei dati dei pazienti

Il ciclo di acquisizione e valutazione dei dati dei pazienti è un processo strutturato che inizia con la prenotazione dell'esame e prosegue attraverso una serie di passaggi ben definiti fino al confronto post-operatorio. Inizialmente, il paziente prenota

l'esame, che è il primo passo fondamentale per avviare il percorso diagnostico e terapeutico.

Successivamente, viene eseguita una Tomografia Computerizzata con Cone Beam CT (CBCT), che fornisce immagini tridimensionali dettagliate del piede. Questa fase è cruciale per ottenere una rappresentazione accurata delle strutture ossee e individuare eventuali deformità.

Dopo l'acquisizione dei dati tramite CBCT, segue una valutazione clinica accompagnata dalla ricostruzione digitale del piede. Questo passaggio consente una comprensione approfondita della morfologia del piede e gioca un ruolo chiave nella pianificazione degli interventi successivi.

Il ciclo prevede un periodo di attesa di sei mesi, dopo il quale il paziente può essere sottoposto a un intervento chirurgico. Questo intervallo è essenziale per monitorare le condizioni del piede e preparare adeguatamente il trattamento chirurgico.

Una volta completata l'operazione, si effettua un secondo esame CBCT per raccogliere nuovamente i dati del piede e valutare l'efficacia dell'intervento mediante un'altra ricostruzione digitale e analisi clinica. Questo confronto tra i dati pre e post-operatori è fondamentale per determinare il successo dell'intervento e per pianificare eventuali azioni correttive.

Dopo altri sei mesi, viene effettuato un confronto finale tra le condizioni del piede prima e dopo l'intervento, al fine di valutare compiutamente l'efficacia del trattamento e stabilire gli eventuali miglioramenti o le modifiche necessarie alla terapia. Questo ciclo completo assicura una valutazione dettagliata e dinamica del percorso terapeutico, consentendo una gestione ottimale delle patologie del piede.



## 3.5 Metodi impiegati

Questo capitolo descrive i metodi impiegati nella ricerca, delineando il processo utilizzato per analizzare e quantificare le caratteristiche morfologiche del piede dei pazienti.

Nel contesto di questo studio, ho sviluppato un programma in Matlab che svolge un ruolo centrale nell'analisi dei dati. Il programma è progettato per elaborare i file in formato STL, che rappresentano i modelli tridimensionali del piede dei pazienti, acquisiti tramite scansione CBCT. Una volta importato l'STL nel programma Matlab, questo esegue un'analisi dettagliata della struttura ossea del piede, focalizzandosi in particolare sulla volta plantare.

Il programma, poi, identifica i punti specifici sulle ossa del piede per definire un volume di interesse, e, attraverso algoritmi matematici e geometrici, calcola il volume della volta plantare. Questa quantificazione è cruciale per valutare la presenza e l'entità di eventuali deformità, nonché per monitorare i cambiamenti morfologici che possono verificarsi dopo un intervento chirurgico.

La ricerca in questione si basa sull'analisi dei dati di 5 pazienti, etichettati da Paziente 1 a Paziente 5, ognuno dei quali è stato sottoposto ad un esame CBCT pre e post-operatorio del piede. Questi dati consentono di effettuare un confronto diretto tra le condizioni pre e post-intervento, offrendo una visione dettagliata dell'efficacia del trattamento chirurgico.

Il flusso di lavoro adottato nel presente studio include diverse fasi cruciali:

- **Acquisizione dati:** gli STL dei piedi dei pazienti vengono acquisiti tramite CBCT prima e dopo l'intervento chirurgico
- **Analisi con Matlab:** il programma Matlab elabora i file STL, eseguendo la segmentazione e l'analisi della struttura ossea, con un focus particolare sul calcolo del volume della volta plantare.
- **Valutazione comparativa:** i risultati ottenuti pre e post-operazione per ciascun paziente vengono confrontati per valutare le modifiche morfologiche e quantificare l'effetto dell'intervento chirurgico sulla deformità del piede.

- **Interpretazione dei risultati:** l'analisi dei cambiamenti nel volume della volta plantare aiuta a comprendere l'efficacia dell'intervento chirurgico e fornisce indicazioni preziose per future decisioni terapeutiche.

Questo metodo sistematico è basato su algoritmi e consente un'analisi approfondita e quantitativa delle deformità plantari, contribuendo significativamente alla comprensione del trattamento delle patologie del piede.

# CAPITOLO 4

## Tecniche all'avanguardia per visualizzare e ricostruire la volta plantare

### 4.1 Generalità

Nel presente capitolo, verranno presentate le generalità riguardanti l'algoritmo da me sviluppato per il calcolo del volume dell'arco plantare pre e post operazione di Grice-Green. Il codice è stato implementato con l'utilizzo del software Matlab e ha come input il file STL ricevuto dalla CBCT.

Il programma si basa sulla segmentazione delle diverse strutture ossee presenti nell'STL pre e post operazione, in modo da poter riconoscere e catalogare ciascuna di esse. In particolare, il software analizza l'STL per identificare le ossa notevoli del piede, come ad esempio il calcagno, il cuboide e l'astragalo, e assegna loro un nome per rendere più agevole la loro identificazione e la manipolazione dei dati.

Successivamente, il programma scritto in Matlab individua i punti più distali di ciascuna struttura ossea, con particolare attenzione al calcagno, per il quale vengono identificati due punti necessari per il calcolo del volume. Una volta individuati questi punti, viene creato il modello in 3D del piede a partire ovviamente dalla disposizione originale delle ossa del paziente, in cui il volume sotteso viene evidenziato con un colore apposito per consentire una migliore visualizzazione e analisi.

Il codice si avvale di alcune funzioni matematiche, tra cui la determinazione delle coordinate cartesiane dei punti, il calcolo delle distanze tra i punti e la creazione di una figura in 3D a partire dalle coordinate calcolate. Il volume viene poi calcolato utilizzando un algoritmo di integrazione numerica, che prende in considerazione le coordinate dei punti individuati e le loro distanze.

## **4.1.1 Ricostruzione della pianta del piede**

La ricostruzione della pianta del piede è stata effettuata tramite la proiezione dei punti più distali di ogni osso sull'asse x, alla stessa altezza del distale del calcagno che è effettivamente l'osso di appoggio di ogni piede. Tale metodo è stato scelto in quanto permette di ottenere una pianta del piede parametrica, la quale consente una più agevole valutazione dei dati e una maggiore facilità di elaborazione.

Per la creazione della pianta del piede sono state utilizzate le proiezioni dei centroidi sull'asse x delle ossa notevoli di maggior rilievo, in particolare quelle del mesopiede e del retro-piede, comprese anche quelle dei metatarsi per l'avampiede. Una volta individuati i punti più distali di ogni osso, questi sono stati proiettati sull'asse x, ottenendo così la pianta del piede.

Per effettuare tale operazione, l'STL in ingresso è stato posizionato su un piano, in modo da permettere la valutazione e la ricostruzione della pianta del piede dal punto di vista parametrico.

### **4.1.1.1 Differenze tra pianta reale e parametrica**

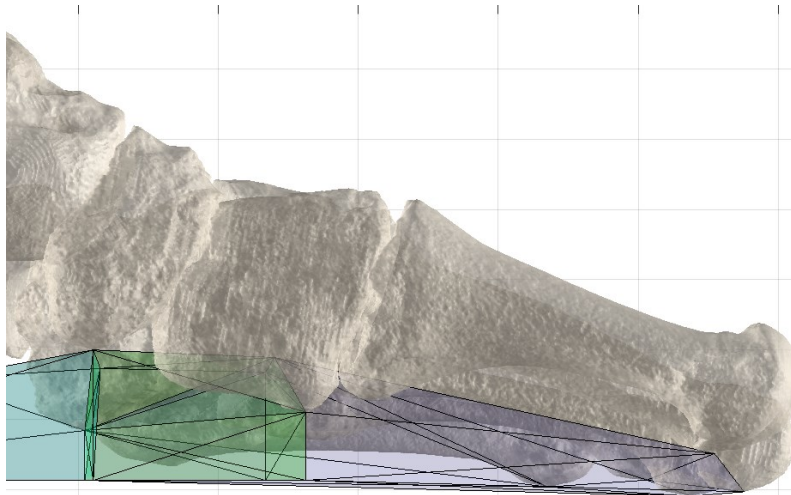
È importante sottolineare che ci sono alcune differenze tra la pianta reale e quella parametrica.

In primo luogo, la pianta reale del piede ha una forma tridimensionale complessa, mentre la ricostruzione parametrica che abbiamo ottenuto è una forma tridimensionale basata con punti distali. Questo significa che alcune informazioni sulla forma della pianta potrebbero andare perdute nella ricostruzione parametrica.

In secondo luogo, nella pianta reale del piede ci sono alcuni dettagli anatomici che non possono essere rappresentati nella ricostruzione parametrica. Ad esempio, i solchi tra le ossa del piede, che sono importanti per la distribuzione del peso del corpo durante la camminata, non sono rappresentati nella ricostruzione parametrica.

Inoltre, è importante notare che la ricostruzione parametrica è basata su una serie di assunzioni e semplificazioni che potrebbero non essere completamente accurate. La difficoltà di questa operazione risiede nella disposizione delle ossa metatarsali nello spazio, infatti, la loro posizione può influire sulla valutazione del volume. Per ovviare a ciò, è stato adottato come riferimento per il punto distale di ciascun metatarso lo stesso metatarso. Quindi ci sarà l'asse del calcagno appurato come asse X fino alle ossa del meso-piede, da queste ossa in poi l'asse verrà costruito fino ad ogni punto distale di ogni metatarso. In questo modo non ci saranno problemi di calcoli del volume nella parte dell'avan-piede.

Nonostante queste differenze la ricostruzione parametrica della pianta del piede può essere ancora utile per scopi di analisi e di valutazione pre e post operazione come vedremo più avanti.



*Figura 4.1: è possibile notare in questa figura come il primo metatarso non sia allineato con gli altri metatarsi e con il piano dettato dal calcagno. Per togliere questo problema ogni metatarso crea il suo asse con le ossa del meso-piede.*

## **4.2 Come si comporta il programma in Matlab?**

Il codice Matlab utilizzato in questo studio è stato sviluppato per la rappresentazione grafica 3D di una porzione del piede umano e del suo relativo volume, suddiviso in tre parti distinte (retro, meso e avan-piede). Questa suddivisione del piede consente una migliore analisi della forma e della funzione del piede umano, in particolare durante la camminata e lo stazionamento.

In questo contesto, il presente lavoro si propone di fornire una metodologia dettagliata per il calcolo del sistema di riferimento anatomico del piede, attraverso l'utilizzo di tecniche di analisi geometrica e biomeccanica.

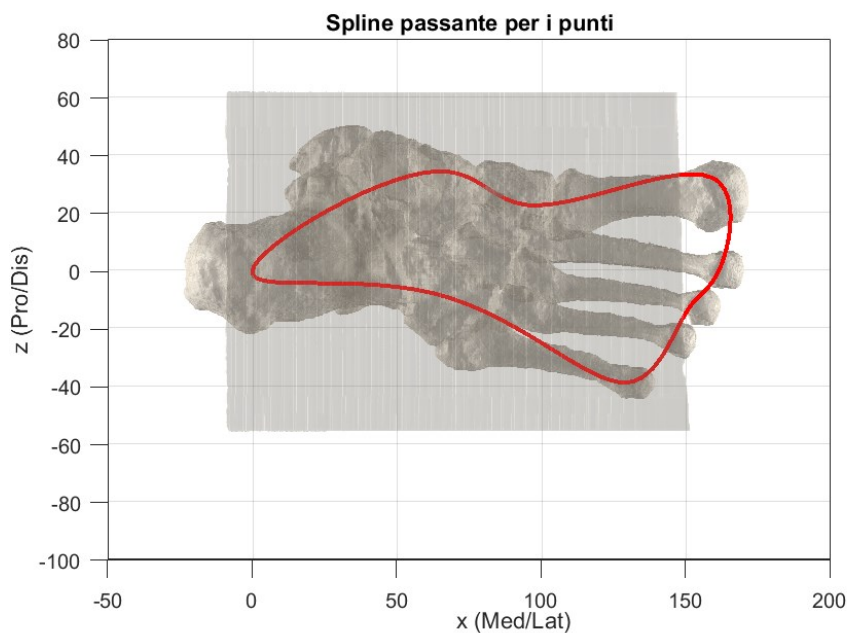
Il metodo proposto si basa sulla selezione di punti anatomici di riferimento e sulla creazione di un sistema di coordinate tridimensionale basato su tre assi anatomici: antero-posteriore, prossimo-distale e medio-laterale. In particolare, il piano d'appoggio del piede viene definito come il piano contenente i punti più bassi del calcagno e della testa del secondo metatarso. La normale a questo piano viene utilizzata come asse z del sistema di riferimento.

Successivamente si utilizzano tecniche di regressione lineare per calcolare l'asse antero-posteriore anatomico e l'asse prossimo-distale anatomico del piede. In particolare, vengono selezionati due punti di riferimento sul piano coronale del calcagno e sul piano frontale del secondo metatarso, che vengono poi proiettati sul piano d'appoggio. L'asse antero-posteriore anatomico viene definito come la direzione del segmento di retta che congiunge questi due punti, mentre l'asse prossimo-distale anatomico viene definito come la direzione del segmento di retta che congiunge un punto sulla superficie plantare del calcagno e un punto sulla superficie plantare del secondo metatarso.

Infine, il metodo utilizza la tecnica di best-fit per calcolare il piano che meglio approssima i punti di riferimento del piede, e determina l'asse medio-laterale anatomico del piede come la direzione perpendicolare al piano best-fit.

Il sistema di riferimento anatomico del piede così calcolato viene poi utilizzato per calcolare altre grandezze biomeccaniche, come l'altezza dei centroidi delle ossa del piede rispetto al piano d'appoggio e la lunghezza dell'asse antero-posteriore del piede. Nel programma verrà anche calcolata la spline.

La spline è una curva matematica liscia che attraversa un insieme di punti specificati senza necessariamente attraversarli tutti, ed è utilizzata per interpolare dati in modo continuo. Questa tecnica è utilizzata in informatica e ingegneria per approssimare curve o superfici di dati discreti che potrebbero non essere facilmente modellabili con altre tecniche di interpolazione. Nel caso specifico di questo script, la spline viene utilizzata per creare una curva liscia che attraversa i punti specificati rappresentando la superficie della suola del piede.



*Fig 4.2: La spline in questo caso rappresenta la suola del piede. Il piede è visto dal basso verso l'alto*

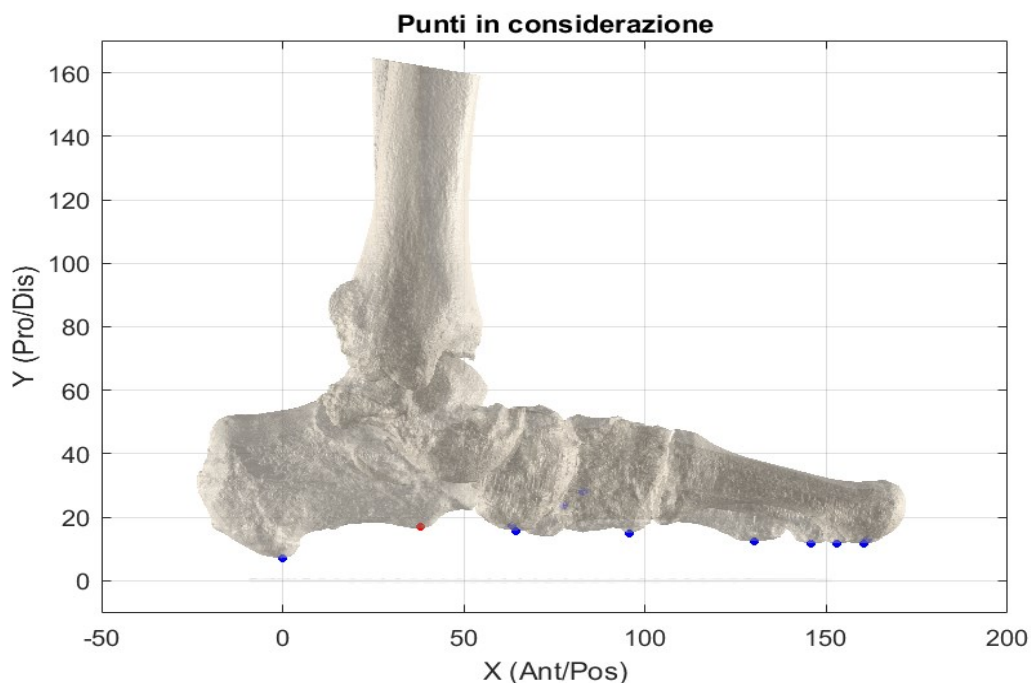
Per rappresentare invece le coordinate dei punti di interesse del piede in uno spazio tridimensionale, è possibile utilizzare il codice Matlab appositamente progettato. Questo codice definisce una serie di punti, ciascuno dei quali rappresenta una particolare area dell'anatomia del piede.

Il primo punto, denominato "punto1", rappresenta il calcagno, mentre i punti dal 3 al 12 rappresentano le ossa metatarsali del piede. I punti 13-17 sono situati sull'asse x e rappresentano rispettivamente il navicolare, il cuboide, il cuneiforme mediale, il cuneiforme interno e il cuneiforme laterale. Inoltre, sono presenti anche i punti 98 e 99, posizionati sullo stesso asse y del calcagno per fornire maggiori dettagli sulla forma e la posizione di questa importante struttura anatomica.

Per una corretta visualizzazione e un corretto calcolo del volume sotteso del piede abbiamo deciso di aggiungere un secondo punto (punto2) notevole sul calcagno,

questo punto è calcolato al momento in maniera manuale e in base al tipo di piede inserito. È sicuramente un limite nel programma in quanto un sesto piede non potrà essere analizzato automaticamente se non modificando prima il codice. Successivamente si parlerà di questo limite e di come poterlo annullare completamente rendendo il programma completamente automatizzato per ogni tipologia di piede.

La rappresentazione grafica 3D di oggetti tridimensionali è un campo di grande interesse per molte applicazioni, tra cui la chirurgia ortopedica. In particolare, la possibilità di creare una rappresentazione 3D del piede umano può fornire importanti informazioni per il trattamento di patologie ossee o articolari.



*Figura 4.3: Il punto in rosso è stato aggiunto al corretto calcolo del volume dell'arco plantare del piede mentre in blu i punti più distali di ogni osso notevole.*

In questo contesto, il calcolo del volume delle diverse parti del piede può essere un'informazione preziosa per la valutazione delle condizioni patologiche e la pianificazione del trattamento. Il presente studio si propone di descrivere il codice Matlab utilizzato per la rappresentazione 3D di una porzione del piede umano e il calcolo del volume delle sue tre parti distinte.

Tuttavia, il calcolo del volume di ogni parte può essere un'operazione complessa, poiché richiede la determinazione dell'involuppo convesso di un insieme di punti.



Per questo scopo, il codice utilizza la funzione "convhull", che calcola il guscio convesso di un insieme di punti, ovvero il più piccolo involucro convesso che contiene tutti i punti dell'insieme. In pratica, viene calcolato un poligono solido che copre tutti i punti dell'insieme e i cui lati sono segmenti che congiungono i punti.

Una volta calcolato il guscio convesso di ogni parte del piede, la funzione "trisurf" viene utilizzata per visualizzare i poligoni solidi colorandoli rispettivamente in ciano, verde e blu. La trasparenza di ogni poligono viene impostata a 0.2 per consentire una migliore visualizzazione delle parti sovrapposte.

È importante notare che c'è un problema nel codice originale, dove i due volumi (il meso-piede e l'avan-piede) hanno una parte che si calcola due volte per il volume. Per risolvere questo problema, il codice calcola la matrice che si sovrappone a parte (in nero) e la sottrae dal volume dell'avan-piede, fornendo un valore corretto per il calcolo del volume.

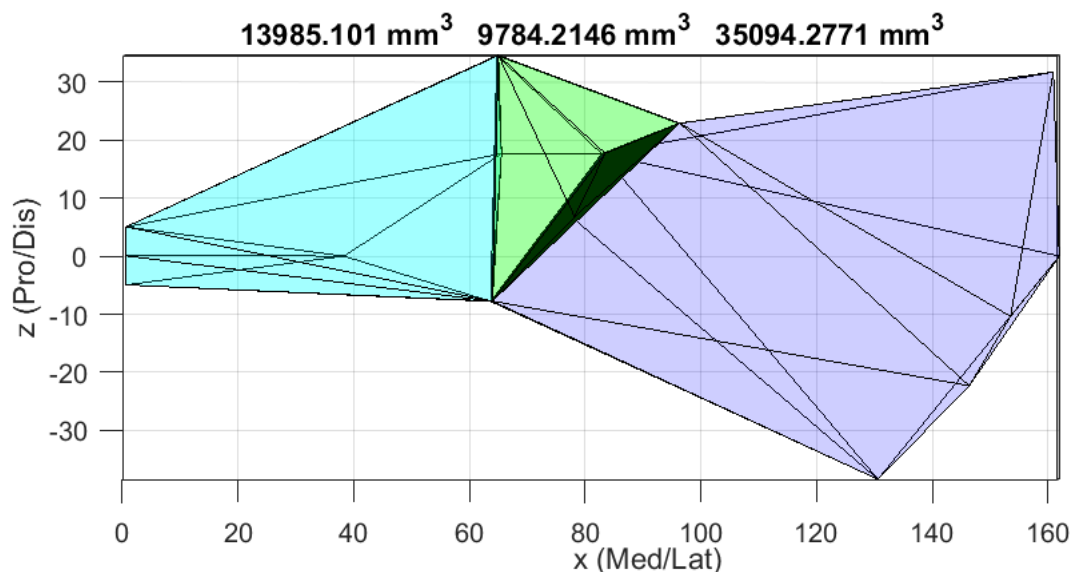


Figura 4.4: In questa figura è evidenziata in nero il volume ridondante che viene calcolato dal programma in maniera automatica. Sono presenti in ciano il volume del retro-piede, in verde quello del meso-piede e in viola quello dell'avan-piede. La parte in comune è appunto quella nera da sottrarre.

Infine, il codice calcola il volume totale del modello, sommando i volumi delle diverse parti calcolate in precedenza. Questo calcolo del volume totale del modello è utile per analizzare la forma e la struttura del piede umano in maniera funzionale e per riuscire a confrontare le differenti parti che compongono il piede e riuscire a capire dove l'intervento di Grice-Green è stato più efficace. Ad esempio, può essere utilizzato per studiare l'effetto di diverse condizioni sul piede, come l'obesità o le patologie del piede.

# CAPITOLO 5

## Metodiche di valutazione

### 5.1 Misure pre-operatorie

I dati di volume del piede sono stati raccolti da cinque pazienti preoperatori, di cui 1 destro e 4 sinistri, tutti affetti da piedi piatti. Inizialmente è stato effettuato l'acquisizione della scansione CBCT dei piedi tramite il software Mimics. Successivamente, sono stati identificate e segmentate le varie ossa presenti nella scansione, tra cui calcagno, astragalo, scafoidi, cuneiformi, metatarsi e falangi.

Il programma Matlab è stato eseguito ogni volta per ogni piede in modo da avere dati personalizzati per ogni paziente. Si avranno due lettere per distinguere i differenti pazienti.

Paziente (PRE)	Retro-piede ( $mm^3$ )	Meso-piede ( $mm^3$ )	Avan-piede ( $mm^3$ )	Volume totale ( $mm^3$ )
PZ1	16423	8295	28218	52936
PZ2	13985	9784	35094	58864
PZ3	13366	5141	28769	47276
PZ4	12683	9684	22006	44373
PZ5	8402	6018	18446	32866

La media per ogni categoria:

**Media Retro-piede:** 12880  $mm^3$

**Media Meso-piede:** 9257.8  $mm^3$

**Media Avan-piede:** 26614.8  $mm^3$

**Media Volume Totale:** 48752.4  $mm^3$

Da questi dati si capisce che l'avan-piede è la parte con il maggior volume del piede.

**Analisi generale dei dati:** si può notare una grande variazione tra i pazienti e anche all'interno della stessa categoria di piede (Retro-piede, Meso-piede, Avan-piede). Ciò suggerisce che ogni paziente potrebbe avere una situazione e un grado diversi per la patologia di piedi piatti in questione. I valori dei piedi PZ5 e PZ4 sono quelli più bassi il che suggerisce che potrebbero essere i pazienti con maggiori problemi e richiedere maggiori attenzioni dal punto di vista del trattamento.

Il valore minimo in assoluto della tabella è  $5141 \text{ mm}^3$  per il meso-piede del paziente PZ3. Valori molto bassi in una delle due categorie del piede potrebbero indicare una patologia o una anomalia, come nel caso di un piede piatto. Nel caso specifico, un valore basso nel meso-piede potrebbe indicare una riduzione o addirittura un'assenza della curvatura dell'arco longitudinale del piede.

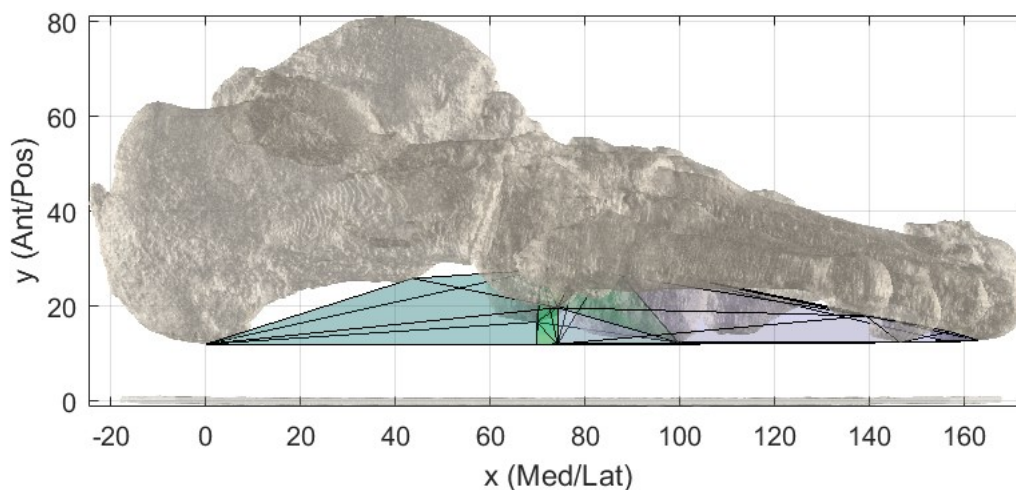


Figura 5.1: Il piede PZ3 destro, si può vedere che il paziente ha un arco plantare quasi nullo; infatti, le ossa del meso-piede (cuboide, navicolare) toccano quasi l'asse X del calcagno.

Guardando ai dati forniti, notiamo che il paziente PZ5 presenta valori molto bassi di retro-piede, meso-piede, e avan-piede rispetto agli altri pazienti. Ciò suggerisce la presenza di una forma particolarmente avanzata di piede piatto patologico in questo paziente. Questo porta a un'alterazione della distribuzione dei pesi sui piedi, con conseguenze negative sulla postura e sul movimento del paziente.

Dopo l'intervento chirurgico di Grice-Green si aspetta che il paziente PZ5 mostri un miglioramento significativo della sua condizione. In particolare, l'intervento mira a ricostruire l'arco longitudinale del piede attraverso la correzione delle strutture ossee e dei tessuti molli coinvolti.

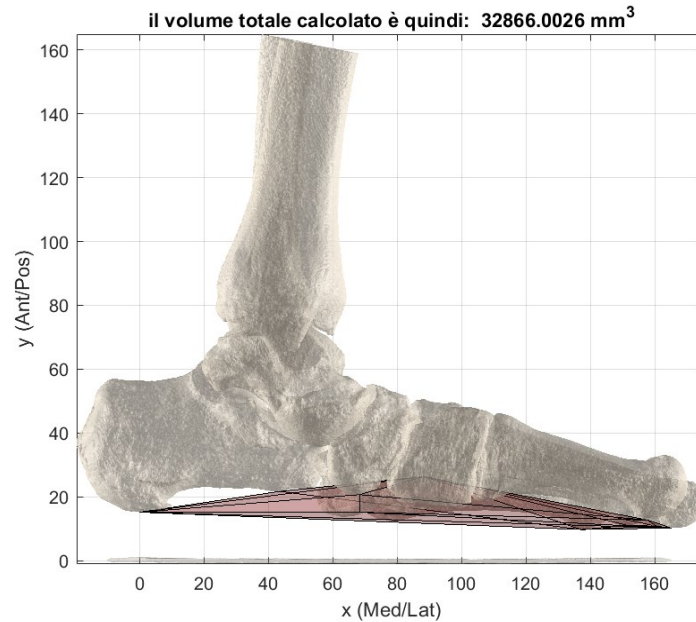


Fig 5.2: Piede PZ5 prima dell'intervento

Questo dovrebbe portare ad un aumento del volume complessivo del piede, in quanto l'arco ricostruito solleverà la volta plantare, ripristinando la normale distribuzione dei pesi e riducendo i sintomi associati al piede piatto patologico.

Tuttavia, è importante notare che la riuscita dell'intervento dipende da molti fattori, tra cui la gravità della malformazione, l'età del paziente e il grado di attenzione post-operatoria. Inoltre, ogni paziente ha una risposta individuale all'intervento, che può variare notevolmente da caso a caso. Pertanto, è difficile fare previsioni precise ma ci aspettiamo comunque un grande miglioramento nella tabella successiva.

## 5.2 Misure post-operatorie

Per quanto riguarda i dati dei post-operatori ecco qui la tabella aggiornata.

<b>Paziente (POST)</b>	<b>Retro-piede (<math>mm^3</math>)</b>	<b>Meso-piede (<math>mm^3</math>)</b>	<b>Avan-piede (<math>mm^3</math>)</b>	<b>Volume totale (<math>mm^3</math>)</b>
<b>PZ1</b>	15863	12411	28759	57033
<b>PZ2</b>	17470	15279	41413	74162
<b>PZ3</b>	14849	10076	27710	52635
<b>PZ4</b>	16275	13384	32253	61912
<b>PZ5</b>	11522	9972	26963	48457

Per ogni piede, sono state prese in considerazione le misure di volume del retro-piede, del meso-piede e dell'avampiede, ottenute tramite l'algoritmo descritto nel capitolo precedente.

La media per ogni categoria:

**Media Retro-piede:**  $15287.8 \text{ mm}^3$

**Media Meso-piede:**  $10381.2 \text{ mm}^3$

**Media Avan-piede:**  $31151.4 \text{ mm}^3$

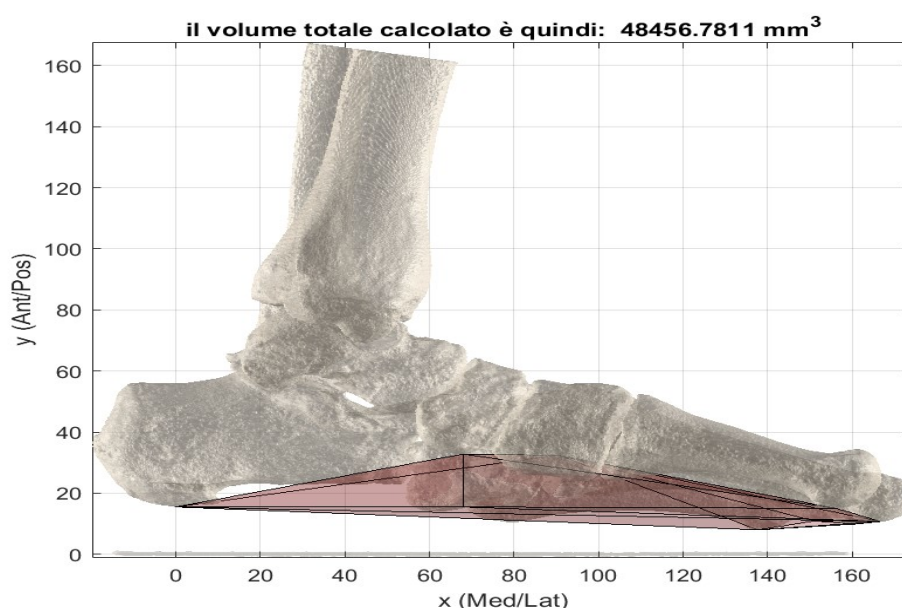
**Media Volume Totale:**  $56820.4 \text{ mm}^3$

La media post-operatoria della seconda tabella è maggiore rispetto alla media post-operatoria della prima tabella in tutte le categorie: Retro-piede, Meso-piede, Avampiede e Volume Totale. Ciò indica che, in generale, i pazienti nella seconda tabella hanno raggiunto risultati migliori dopo l'intervento chirurgico rispetto ai pazienti nella prima tabella.

In particolare, si nota un aumento significativo nel valore medio dell'Avampiede nella seconda tabella, che è passato da  $24.9 \text{ cm}^3$  nella prima tabella a  $30.5 \text{ cm}^3$  nella seconda tabella. Questo suggerisce che l'intervento chirurgico ha portato a un miglioramento significativo del supporto dell'avampiede, che è essenziale per la funzionalità del piede.

Guardando alla seconda tabella, possiamo notare che tutti i pazienti presentano un aumento del volume totale del piede dopo l'intervento chirurgico di Grice-Green, come atteso. In generale, i valori sono più alti rispetto alla prima tabella, il che suggerisce un miglioramento della condizione dei pazienti dopo l'intervento. Questi dati confermano l'efficacia dell'operazione chirurgica nel ripristinare una normale deambulazione nei pazienti affetti da piede piatto, permettendo una distribuzione uniforme del peso del corpo sul piede.

Per quanto riguarda il valore minimo, notiamo che il paziente PZ5 presenta ancora valori relativamente bassi di retro-piede, meso-piede e avampiede, nonostante l'intervento chirurgico. Questo potrebbe suggerire, come già detto, che la malformazione era particolarmente grave. I valori di PZ5 nella seconda tabella sono effettivamente migliorati rispetto alla prima tabella. Nella prima tabella, il Volume Totale del piede PZ5 era di  $32,866 \text{ cm}^3$ , mentre nella seconda tabella è aumentata a  $48,457 \text{ cm}^3$ . Questo rappresenta un miglioramento del 47,6% nel Volume Totale del piede del paziente PZ5 dopo l'intervento chirurgico.



*Fig 5.3: Piede PZ5 dopo l'intervento. Rispetto alla figura precedente è facilmente notabile l'aumento di volume nella zona del meso-piede.*

## 5.3 Confronto dati pre e post-operatori

In questa analisi, sono state confrontate due tabelle contenenti dati pre e post operazionali di pazienti sottoposti a un intervento di correzione di piedi piatti con un intervento di Grice-Green. I dati raccolti sono stati espressi in millimetri cubi e rappresentano il volume sotteso del piede. Studiamo solo questi due settori e gli diamo maggior importanza in quanto sono quelli interessati dall'intervento chirurgico.

Paziente	Retro-piede ( $mm^3$ ) pre-op	Retro-piede ( $mm^3$ ) post-op	Aumento Retro-piede %	Meso-piede ( $mm^3$ ) pre-op	Meso-piede ( $mm^3$ ) post-op	Aumento Meso-piede %
PZ1	16423	15863	-3.4%	8295	12411	49.4%
PZ2	13985	17470	24.9%	9784	15279	56.3%
PZ3	13366	14849	11.1%	5141	10076	95.7%
PZ4	12683	16275	28.3%	9684	13384	38.1%
PZ5	8402	11522	37.0%	6018	9972	65.8%

Dai dati si può osservare che per tutti i pazienti, ad eccezione di PZ1, si è registrato un aumento del volume del retro-piede post-intervento. In particolare, i pazienti PZ2 e PZ5 hanno mostrato l'aumento più significativo del volume del retro-piede, con incrementi del 37.0% e 24.9%, rispettivamente.

Per quanto riguarda il meso-piede, tutti i pazienti hanno mostrato un aumento del volume post-intervento, con aumenti percentuali che vanno dal 38.1% del paziente PZ4 al 95.7% del paziente PZ3. Il paziente PZ5 ha registrato il maggior incremento percentuale del volume del meso-piede (65.8%).

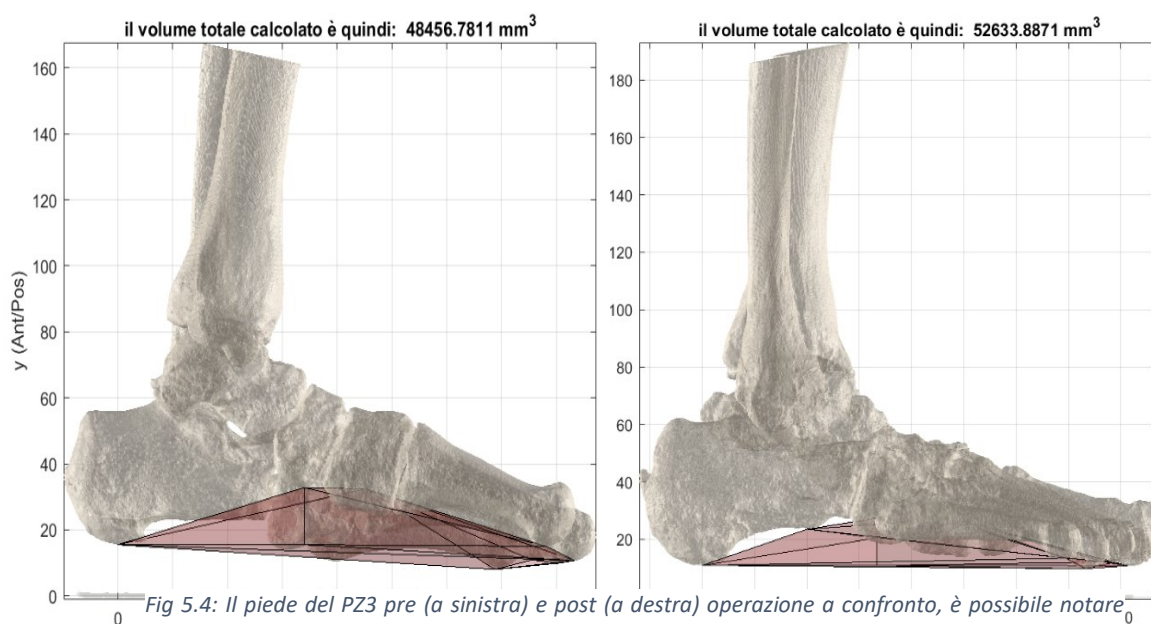
I risultati del confronto tra le tabelle pre e post-operatorie mostrano che la maggior parte dei pazienti ha beneficiato dell'intervento, con un aumento del volume nel

retro-piede e nel meso-piede. Questi aumenti del volume del retro-piede indicano un miglioramento dell'anatomia del piede, grazie all'intervento chirurgico, con un aumento del supporto e della stabilità del tallone, che può portare a una migliore funzionalità e riduzione del dolore nel piede.

Guardando ai dati delle tabelle pre e post-operatorie, possiamo vedere che il paziente che ha ottenuto il maggior beneficio dall'intervento di Grice-Green è PZ2, l'aumento del volume nel retro-piede e nel meso-piede, come quello mostrato dal paziente PZ2, indica una migliore distribuzione del carico sul piede e una riduzione dello stress sui tessuti molli. Questo può portare a una riduzione del dolore e dell'instabilità del piede, migliorando la qualità della vita del paziente e consentendo una maggiore partecipazione alle attività quotidiane.

Si nota invece, che il paziente PZ3 ha sperimentato un aumento del 95,7% del volume nel meso-piede dopo l'intervento di Grice-Green. È importante sottolineare che il paziente PZ3 ha inizialmente presentato un alto grado di pronazione e ha sperimentato una riduzione significativa di questo problema dopo l'intervento. Questo indica che l'intervento di Grice-Green è particolarmente efficace nei casi di pronazione eccessiva e può portare a miglioramenti significativi nella funzionalità del piede.

È importante sottolineare che l'aumento del volume dei 5 piedi nel retro-piede e nel meso-piede è stato più significativo rispetto all'avan-piede.





## 5.4 Analisi Statistica dei dati: applicazione del t-test su Matlab

L'analisi statistica gioca un ruolo cruciale nell'interpretazione dei dati sperimentali, permettendoci di trarre conclusioni oggettive dalle osservazioni raccolte. In questo studio, abbiamo eseguito un'analisi comparativa delle misurazioni volumetriche del piede (retro-piede, meso-piede, avan-piede e volume totale) prima e dopo l'intervento di Grice-Green nei pazienti. Per valutare la significatività statistica delle differenze osservate, abbiamo applicato il t-test, uno degli strumenti statistici più utilizzati nelle scienze mediche e biologiche.

Esistono due versioni principali del t-test: il t-test appaiato (ttest) e il t-test indipendente (ttest2). La scelta tra queste due versioni dipende dalla natura dei dati e dalla specifica ipotesi sottostante.

Il t-test appaiato è utilizzato quando le osservazioni nei due gruppi sono correlate o appaiate in modo sistematico. Nel nostro caso, abbiamo misurazioni pre e post-trattamento per gli stessi soggetti, rendendo le osservazioni all'interno di ogni coppia intrinsecamente connesse. Di conseguenza, il t-test appaiato è stato selezionato per analizzare le differenze medie nei volumi del piede, poiché tiene conto della correlazione intrasoggetto tra le misurazioni.

Al contrario, il t-test indipendente è appropriato quando si confrontano due gruppi distinti e non correlati di osservazioni. Questo non era il caso del nostro studio, pertanto il t-test indipendente è stato escluso dall'analisi.

Il t-test appaiato è stato applicato per confrontare le misurazioni pre e post in ciascuna delle regioni del piede e per il volume totale. Questo test calcola la differenza tra le coppie di osservazioni (pre e post) per ciascun paziente, analizzando se la media di queste differenze differisce significativamente da zero. In termini statistici, il test verifica l'ipotesi nulla secondo cui la media delle differenze è zero contro l'ipotesi alternativa che la media delle differenze sia diversa da zero.

L'analisi ha prodotto i seguenti risultati:

**Retro-piede:**

**P-value: 0.0485**

Interpretazione: Questo p-value suggerisce che l'intervento di Grice-Green ha avuto un impatto significativo sul volume del retro-piede nei pazienti con piede piatto, con una significatività al livello del 5%. La probabilità che tale differenza si verifichi per caso è bassa, indicando un effetto reale dell'intervento.

Implicazioni: La significatività osservata nel retro-piede indica che l'intervento di Grice-Green può essere particolarmente efficace nel modulare questa regione in pazienti con piede piatto. Questo risultato sottolinea l'importanza di considerare tali interventi nel piano di trattamento complessivo per i piedi piatti.

**Meso-piede:**

**P-value: 0.000187**

Interpretazione: Il p-value estremamente basso dimostra che l'intervento di Grice-Green ha prodotto cambiamenti molto significativi nel volume del meso-piede. Questo risultato fornisce un'evidenza robusta dell'efficacia dell'intervento in questa specifica zona nei pazienti con piede piatto.

Implicazioni: L'elevata significatività nel meso-piede suggerisce che l'attenzione a questa area durante l'intervento di Grice-Green è cruciale e può portare a miglioramenti notevoli nei pazienti affetti da piede piatto.

**Avan-piede:**

**P-value: 0.0909**

Interpretazione: Nonostante il p-value superi la soglia convenzionale del 5%, si avvicina a tale valore, suggerendo una possibile tendenza che l'intervento di Grice-Green potrebbe avere un effetto sull'avan-piede nei pazienti con piede piatto, sebbene non statisticamente significativa in questo studio.

Implicazioni: La potenziale tendenza osservata nell'avan-piede può motivare ulteriori ricerche o la raccolta di dati su un campione più ampio per determinare l'efficacia dell'intervento di Grice-Green in questa regione per i pazienti con piede piatto.

### **Volume Totale:**

**P-value: 0.0149**

Interpretazione: Il p-value inferiore a 0.05 per il volume totale conferma che l'intervento di Grice-Green ha avuto un impatto significativo sul volume totale del piede nei pazienti affetti da piede piatto. Questo indica che l'intervento ha un effetto benefico sull'intero piede.

Implicazioni: La significatività del volume totale è particolarmente rilevante, poiché dimostra che l'intervento di Grice-Green offre benefici misurabili e complessivi per i pazienti con piede piatto, influenzando positivamente la struttura del piede nel suo insieme.

I risultati dell'analisi hanno rivelato che l'intervento di Grice-Green ha un impatto statisticamente significativo sul retro-piede e sul volume totale del piede, indicando un beneficio tangibile del trattamento in queste aree.

Questi risultati non solo rafforzano la validità dell'intervento di Grice-Green come opzione terapeutica per i pazienti con piede piatto ma offrono anche una base quantitativa per comprendere meglio in quali aree del piede l'intervento è più efficace. Inoltre, i dati evidenziano l'importanza di un'analisi dettagliata e segmentata del piede per ottimizzare le strategie di trattamento individualizzate, assicurando che gli interventi siano mirati efficacemente per massimizzare i benefici per i pazienti.

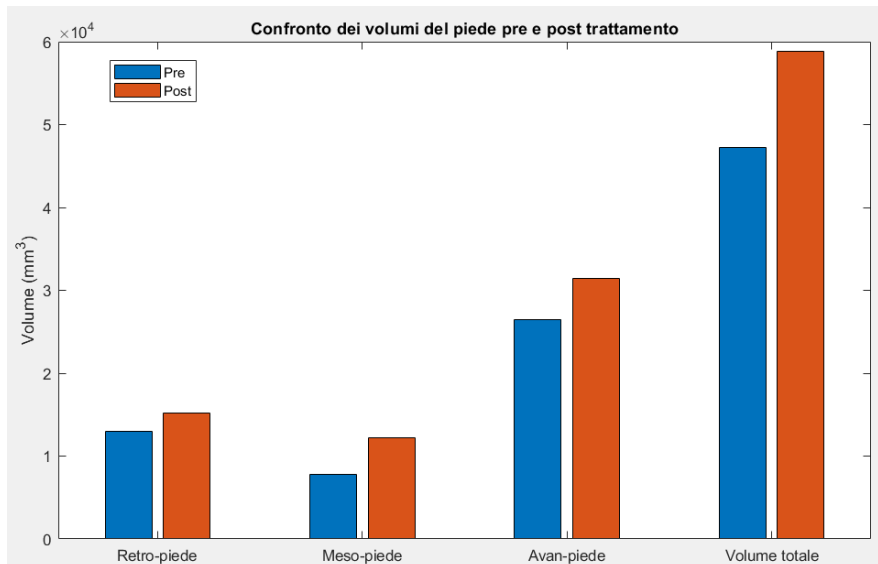


Fig. 5.5: Confronto dei volumi medi del piede nelle regioni del retro-piede, meso-piede, avan-piede e del volume totale, prima (Pre, in blu) e dopo (Post, in rosso) l'intervento di Grice-Green in pazienti con piede piatto.

## 5.5 Discussione sulle tecniche utilizzate dalla procedura

La valutazione del volume dell'arco plantare prima e dopo l'intervento di Grice-Green ha richiesto l'impiego di diverse tecniche che verranno approfondite in questo capitolo al fine di valutarne l'efficacia nel contesto della nostra procedura innovativa.

L'analisi degli STL pre e post-operatori è stata condotta attraverso l'utilizzo del software Matlab. Questo strumento ci ha consentito di importare gli STL e di procedere all'identificazione di ciascuna struttura ossea, assegnandole un nome per una precisa identificazione. Successivamente, abbiamo selezionato i punti più distali di ciascun osso significativo per garantire una ricostruzione accurata del piede in tre dimensioni.

La creazione della pianta del piede parametrica è stata realizzata mediante la proiezione dei punti più distali di ciascun osso sull'asse x, all'altezza del distale del calcagno, considerato come punto di riferimento. Questa metodologia ci ha consentito di ottenere una pianta del piede parametrica che facilita una valutazione dettagliata del volume dell'arco plantare.

Il calcolo del volume dell'arco plantare prima e dopo l'intervento è stato eseguito utilizzando la funzione convhull di Matlab. Questa funzione ha consentito di calcolare il guscio convesso dei punti più distali di ciascun osso, fornendo una stima accurata del volume dell'arco plantare.

Il confronto tra le misurazioni pre e post-operatorie ha evidenziato un aumento del volume in tutte le zone del piede: avanpiede, mesopiede e retro piede. Questi risultati confermano l'efficacia dell'intervento chirurgico nel ripristinare una normale deambulazione, sottolineando il valore della nostra nuova procedura nell'affrontare le condizioni patologiche del piede con successo.

## **5.6 Discussione sui risultati ottenuti**

Il presente lavoro ha condotto l'analisi del volume dell'arco plantare di cinque pazienti affetti da piede piatto sottoposti a intervento chirurgico di Grice-Green. In particolare, i volumi sono stati misurati sia pre che post intervento al fine di valutare l'efficacia della procedura chirurgica nel ripristinare la conformazione anatomica del piede.

Dai risultati ottenuti si può notare un aumento significativo del volume post-operatorio in ogni zona del piede (avan-piede, meso-piede e retro-piede) rispetto ai valori pre-operatori, confermando l'efficacia della procedura chirurgica.

Le differenze tra i volumi pre e post operatori sono probabilmente attribuibili al ripristino dell'arco plantare, evidenziando l'importanza di tale struttura nella distribuzione del carico del peso corporeo sul piede. Inoltre, il ripristino dell'arco plantare potrebbe aver migliorato la funzione biomeccanica del piede, contribuendo a una migliore deambulazione.

È importante notare che il presente studio è limitato dal numero ristretto di pazienti inclusi nella valutazione. Ulteriori ricerche con un maggior numero di pazienti e un follow-up a lungo termine potrebbero aiutare a confermare i risultati ottenuti.

In conclusione, i risultati ottenuti nel presente studio indicano che la procedura chirurgica di Grice-Green può essere efficace nel ripristinare l'arco plantare nei

pazienti affetti da piede piatto, migliorando la funzione biomeccanica del piede e la qualità della deambulazione.

## **5.7 I limiti della procedura adottata**

Nonostante i risultati positivi ottenuti, la procedura presenta alcuni limiti che meritano considerazione. Il principale riguarda l'approccio manuale per individuare il secondo punto sul calcagno. Sebbene il programma sia in grado di identificare automaticamente i punti distali di ogni osso, trovare manualmente il secondo punto sul calcagno richiede tempo e competenze specifiche da parte dell'operatore, aumentando il rischio di errori.

Un altro limite riguarda la mancanza di un sistema automatico per valutare la gravità del piede. Attualmente, l'operatore deve valutare manualmente questo aspetto e inserire l'informazione nel software, richiedendo un livello di esperienza non sempre disponibile.

Per migliorare la procedura, sarebbe auspicabile lo sviluppo di un sistema automatico in grado di individuare il secondo punto sul calcagno e riconoscere la gravità del piede. Tuttavia, è importante sottolineare che, sebbene siano in corso sviluppi nel campo dell'intelligenza artificiale e del machine learning per automatizzare tali processi, al momento l'azione umana rimane essenziale per garantire precisione e affidabilità.

# CAPITOLO 6

## Conclusione

La presente ricerca rappresenta un contributo significativo nell'ambito dell'ingegneria biomedica, focalizzata sull'analisi e l'ottimizzazione della procedura chirurgica di correzione del piede piatto attraverso l'intervento di Grice-Green. Attraverso un'approfondita analisi delle tecniche di valutazione pre e post-operatoria, nonché dei risultati ottenuti sui pazienti sottoposti all'intervento, siamo giunti a conclusioni importanti per la comprensione e il miglioramento della pratica clinica in questo settore.

I risultati hanno dimostrato che l'intervento di Grice-Green ha prodotto un significativo aumento del volume dell'arco plantare, confermando l'efficacia della procedura nel ripristinare la conformazione anatomica del piede e migliorare la sua funzione biomeccanica. Questi risultati sono fondamentali per fornire evidenze sperimentali sulla validità e l'efficacia dell'intervento chirurgico, informando la pratica clinica e guidando lo sviluppo di future innovazioni nel campo.

Tuttavia, è importante riconoscere i limiti della procedura adottata, tra cui la necessità di un approccio manuale per alcuni aspetti della valutazione e la mancanza di un sistema automatico per valutare la gravità del piede. Queste limitazioni evidenziano la necessità di continuare a investire nella ricerca e nello sviluppo di nuove tecnologie e metodologie, al fine di migliorare la precisione, l'efficacia e l'accessibilità delle procedure chirurgiche per i pazienti affetti da piede piatto.

Questa tesi, in conclusione, fornisce un quadro esaustivo e dettagliato della procedura di correzione del piede piatto attraverso l'intervento di Grice-Green, offrendo importanti spunti per futuri studi e sviluppi nel campo dell'ortopedia e dell'ingegneria biomedica. L'obiettivo ultimo rimane quello di migliorare la qualità della vita dei pazienti affetti da piede piatto, attraverso l'innovazione e l'eccellenza nella pratica clinica e nella ricerca scientifica.

## **6.1 Applicazioni e Sviluppi Futuri e come superare i limiti della procedura**

L'applicazione descritta in questa tesi offre numerose possibilità di sviluppo e applicazioni future. Oltre alla chirurgia del piede, può essere impiegata in ortopedia, podologia ed ergonomia. Ad esempio, può assistere nel trattamento chirurgico del piede piatto e nella progettazione di calzature personalizzate per garantire maggiore comfort e stabilità ai pazienti.

Tuttavia, le attuali limitazioni legate alla necessità di individuare manualmente il secondo punto sul calcagno possono essere superate. Una soluzione potenziale è la creazione di una linea che collega il punto più distale del calcagno al suo punto massimo, seguita dalla connessione di questo punto al centroide del calcagno per individuare automaticamente il secondo punto notevole. Ciò consentirebbe un calcolo più preciso del volume del piede, eliminando la necessità di una calibrazione manuale aggiuntiva.

Inoltre, l'applicazione potrebbe essere potenziata per rilevare automaticamente la gravità del piede del paziente, migliorando così la precisione dell'analisi e facilitando una diagnosi tempestiva e una terapia personalizzata.

L'applicazione descritta rappresenta, quindi, un notevole avanzamento nella valutazione della geometria del piede. I futuri sviluppi potrebbero portare a miglioramenti significativi e a un'ampia gamma di applicazioni, migliorando la qualità della vita dei pazienti e semplificando il lavoro dei professionisti del settore.





## APPENDICE

%% Costruzione sistema di riferimento anatomico

% Equazione del piano best-fit corrispondente al piano d'appoggio

```
plane = fitPlane(vert_pian);
```

```
nor = planeNormal(plane); % normale al piano
```

% Diverse possibilità di scelta del punto plantare a seconda delle necessità:

% 1) Punto plantare rispetto al piano frontale del segmento osseo

% 2) Punto plantare rispetto al sistema di riferimento macchina

% 3) Punto plantare rispetto alla normale al piano d'appoggio

% 1) Punto plantare rispetto al piano coronale del calcagno

```
[centroide_ca,asse_max_cal,asse_med_ca,asse_min_cal] = calcolo_componenti(sogg.CA.V);
```

```
asse_ap_CA = asse_max_cal(1,4:6);
```

```
asse_pd_CA = asse_med_ca(1,4:6);
```

```
asse_ml_CA = asse_min_cal(1,4:6);
```

```
box_CA = boundingBox3d(sogg.CA.V);
```

```
lung_ca = box_CA(1,4) - box_CA(1,3);
```

```
Box = [box_CA(1,1) box_CA(1,2) box_CA(1,4)-lung_ca/2 box_CA(1,4) box_CA(1,5)  
box_CA(1,6)];
```

```
parte_post_ca = clipPoints3d(sogg.CA.V, Box);
```

```
plane_ca = createPlane(centroide_ca,asse_ap_CA); % piano frontale del calcagno
```

```
punti_post_ca = projPointOnPlane(parte_post_ca, plane_ca); % proiezione dei punti posteriori sul
piano frontale
```

```
Point_ca = pointCloud(punti_post_ca);
```

```
limiteinf = min(Point_ca.Location(:,3));
```

```
[vert_d_m, ~]= find(Point_ca.Location(:,3)==limiteinf);
```

```
vertice_dist_ca = parte_post_ca(vert_d_m,:);
```

```
% 3) Punto plantare rispetto la normale al piano d'appoggio
```

```
n = createLine3d(centroide_ca, nor(1),nor(2),nor(3));
```

```
pnt_ca = projPointOnLine3d(sogg.CA.V, n);
```

```
Point_ca = pointCloud(pnt_ca);
```

```
limiteinf = min(Point_ca.Location(:,3));
```

```
[vert_d_m, ~]= find(Point_ca.Location(:,3)==limiteinf);
```

```
vertice_dist_ca3 = sogg.CA.V(vert_d_m,:);
```

```
% Secondo metatarso
```

```
% 1)Punto plantare rispetto al piano frontale del segmento
```

```
[cent_m2,asse_max_m2,~,~] = calcolo_componenti(sogg.M2.V);
```

```
asse_ap_m2 = normalizeVector3d(asse_max_m2(1,4:6));
```

```
box_m2 = boundingBox3d(sogg.M2.V);
```

```
lung_m2 = box_m2(1,4)-box_m2(1,3);
```

```
Box_m2 = [box_m2(1,1) box_m2(1,2) box_m2(1,3) box_m2(1,3)+lung_m2/3 box_m2(1,5)
box_m2(1,6)];
```

```
% Box_m2 = [box_m2(1,1) box_m2(1,2) box_m2(1,3) box_m2(1,4)-lung_m2/3 box_m2(1,5)
box_m2(1,6)];
```

```
plane_f_m2 = createPlane(cent_m2,asse_ap_m2);
```

```
parte_ant_m2 = clipPoints3d(sogg.M2.V, Box_m2);
```

```
punti_m2_ant = projPointOnPlane(parte_ant_m2, plane_f_m2);
```

```
%Punto plantare rispetto al piano coronale di m2
```

```
Punti_m2 = pointCloud(punti_m2_ant);
```

```
limiteinf_m2 = min(Punti_m2.Location(:,3));
```

```
[vert_dis_m, ~]= find(Punti_m2.Location(:,3)==limiteinf_m2);
```

```
vertice_dist_m2 = parte_ant_m2(vert_dis_m,:);
```

```
% 3) Punto plantare secondo la normale al piano d'appoggio
```

```
n2 = createLine3d(cent_m2, nor(1),nor(2),nor(3));
```

```
pnt_m2 = projPointOnLine3d(sogg.M2.V, n2);
```

```
Point_m2 = pointCloud(pnt_m2);
```

```
limiteinf2 = min(Point_m2.Location(:,3));
```

```
[vert_d_m2, ~]= find(Point_m2.Location(:,3)==limiteinf2);
```

```
vertice_dist_m23 = sogg.M2.V(vert_d_m2,:);
```

```
%% Sistema di riferimento Anatomico di Piede
```

```
% Punti per asse AP
```

```
p1_m = vertice_dist_ca3;
```

```
p2_m = vertice_dist_m23;
```

```
% Proietto i punti sul piano d'appoggio
```

```
A = projPointOnPlane(p1_m, plane);
```

```
B = projPointOnPlane(p2_m, plane);
```

```
% Calcolo asse antero-posteriore anatomico
```

```
X_glo = createLine3d(A,B);
```

```
AP_anat = X_glo(1,4:6);
```

```
AP_anat = normalizeVector3d(AP_anat);
```

```
% Calcolo asse prossimo-distale anatomico
```

```
PD_anat = planeNormal(plane);
```

```
PD_anat = normalizeVector3d(PD_anat);
```

```
%% Calcolo matrice di rotazione per orientare i punti3d nel sistema di riferimento anatomico
```

```
PLANE_anat = [A AP_anat PD_anat];
```

```
Mat_rot = createBasisTransform3d('global',PLANE_anat);
```

```
sogg.TI.V = transformPoint3d(sogg.TI.V,Mat_rot);
```

```
sogg.FI.V = transformPoint3d(sogg.FI.V,Mat_rot);
```

```
sogg.TA.V = transformPoint3d(sogg.TA.V,Mat_rot);
```

```
sogg.CA.V = transformPoint3d(sogg.CA.V,Mat_rot);
```

```
sogg.CU.V = transformPoint3d(sogg.CU.V,Mat_rot);
```

```

sogg.NA.V = transformPoint3d(sogg.NA.V,Mat_rot);

sogg.CM.V = transformPoint3d(sogg.CM.V,Mat_rot);

sogg.CI.V = transformPoint3d(sogg.CI.V,Mat_rot);

sogg.CL.V = transformPoint3d(sogg.CL.V,Mat_rot);

sogg.M1.V = transformPoint3d(sogg.M1.V,Mat_rot);

% sogg.SSM1.V = transformPoint3d(sogg.SSM1.V,Mat_rot); % per i sesamoidi se considerati a
parte

% sogg.SSM5.V = transformPoint3d(sogg.SSM5.V,Mat_rot);

sogg.M2.V = transformPoint3d(sogg.M2.V,Mat_rot);

sogg.M3.V = transformPoint3d(sogg.M3.V,Mat_rot);

sogg.M4.V = transformPoint3d(sogg.M4.V,Mat_rot);

sogg.M5.V = transformPoint3d(sogg.M5.V,Mat_rot);

sogg.Piano.V = transformPoint3d(sogg.Piano.V,Mat_rot);

O = transformPoint3d(A,Mat_rot); % origine del sistema di riferimento il punto plantare del
calcagno

B1 = transformPoint3d(B,Mat_rot);

vert_pian = sogg.Piano.V;

plane = fitPlane(vert_pian); % ricalcolo il piano best-fit nel nuovo sistema di riferimento

% Calcolo asse antero-posteriore anatomico

X_glo = createLine3d(O,B1);

AP_anat = X_glo(1,4:6);

AP_anat = normalizeVector3d(AP_anat);

```

```
% Calcolo asse prossimo-distale anatomico
```

```
PD_anat = planeNormal(plane);
```

```
if PD_anat(1,2)<0
```

```
    PD_anat(1,2)= -1*PD_anat(1,2);
```

```
end
```

```
PD_anat = normalizeVector3d(PD_anat);
```

```
Y_anat = createLine3d(O,PD_anat(1),PD_anat(2),PD_anat(3));
```

```
% Calcolo asse medio-laterale anatomico
```

```
ML_anat = crossProduct3d(AP_anat,PD_anat);
```

```
ML_anat = normalizeVector3d(ML_anat);
```

```
Z_anat = createLine3d(O, ML_anat(1),ML_anat(2),ML_anat(3));
```

```
N = PD_anat;
```

```
X = AP_anat;
```

```
box_f
```

```
=
```

```
boundingBox3d([sogg.TI.V;sogg.FI.V;sogg.TA.V;sogg.CA.V;sogg.NA.V;sogg.CU.V;sogg.CM.V  
;sogg.CI.V;sogg.CL.V;sogg.M1.V;sogg.M2.V;sogg.M3.V;sogg.M4.V;sogg.M5.V;sogg.Piano.V]);
```

```
%% Altezza Centroidi Navicolare e Cuboide
```

```
% 1 CALCAGNO (creato ora)
```

```
c_ca = mean(sogg.CA.V); % centroide del calcagno
```

```
c1_ca = projPointOnPlane(c_ca,plane); % proiezione sul piano d'appoggio
```

```

Hg_CA = distancePoints3d(c_ca, c1_ca); % distanza euclidea

% è sufficiente adattare queste 3 righe di codice per calcolare la distanza

% da terra di ogni segmento osseo

% 2 NAVICOLARE / SCAFOIDE

c_na = mean(sogg.NA.V); % centroide del navicolare

c1_na = projPointOnPlane (c_na,plane); % proiezione sul piano d'appoggio

Hg_NA = distancePoints3d(c_na, c1_na); % distanza euclidea

lineNA_c= createLine3d(c_na,c1_na);

% 3 CUNEIFORME INTERMEDIO

c_ci = mean(sogg.CI.V);

c1_ci = projPointOnPlane (c_ci,plane);

Hg_CI = distancePoints3d(c_ci, c1_ci);

% 4 CUNEIFORME MEDIALE

c_cm = mean(sogg.CM.V);

c1_cm = projPointOnPlane (c_cm,plane);

Hg_CM = distancePoints3d(c_cm, c1_cm);

% 5 CUNEIFORME LATERALE

c_cl = mean(sogg.CL.V);

c1_cl= projPointOnPlane (c_cl,plane);

```



```
Hg_CL = distancePoints3d(c_cl, c1_cl);
```

#### % 6 CUBOIDE

```
c_cu = mean(sogg.CU.V);
```

```
c1_cu = projPointOnPlane (c_cu,plane);
```

```
Hg_CU = distancePoints3d(c_cu, c1_cu);
```

#### % 7 METATARSO 1

```
c_m1 = mean(sogg.M1.V);
```

```
c1_m1 = projPointOnPlane (c_m1,plane);
```

```
Hg_M1 = distancePoints3d (c_m1, c1_m1);
```

#### % 8 METATARSO 2

```
c_m2 = mean(sogg.M2.V);
```

```
c1_m2 = projPointOnPlane (c_m2,plane);
```

```
Hg_M2 = distancePoints3d (c_m2, c1_m2);
```

#### % 9 METATARSO 3

```
c_m3 = mean(sogg.M3.V);
```

```
c1_m3 = projPointOnPlane (c_m3,plane);
```

```
Hg_M3 = distancePoints3d (c_m3, c1_m3);
```

#### % 10 METATARSO 4

```
c_m4 = mean(sogg.M4.V);
```

```
c1_m4 = projPointOnPlane (c_m4,plane);
```

```
Hg_M4 = distancePoints3d (c_m4, c1_m4);
```

```
% 11 METATARSO 5
```

```
c_m5 = mean(sogg.M5.V);
```

```
c1_m5 = projPointOnPlane (c_m5,plane);
```

```
Hg_M5 = distancePoints3d (c_m5, c1_m5);
```

```
% 12 ASTRAGALO
```

```
c_ta = mean(sogg.TA.V);
```

```
c1_ta = projPointOnPlane (c_ta,plane);
```

```
Hg_ta = distancePoints3d (c_ta, c1_ta);
```

```
%lunghezza asse AP per la normalizzazione
```

```
%prendo come lunghezza il segmento AB dove A è il punto plantare del
```

```
%calcagno e B il punto più plantare della testa del secondo metatarso
```

```
AP_segm= distancePoints3d(A,B);
```

```
%% DISTANZA DA TERRA (PUNTO INFERIORE)-->punto più plantare rispetto alla normale al  
piano d'appoggio
```

```
%CALCAGNO 1
```

```
n_calc = createLine3d(c_ca, PD_anat(1),PD_anat(2),PD_anat(3)); %linea dal centroide in direzione normale al piano d'appoggio(ovvero PD anatomico)
```

```
pnt_calc = projPointOnLine3d(sogg.CA.V, n_calc);
```

```
Point_calc = pointCloud(pnt_calc);
```

```
limiteinf_calc = min(Point_calc.Location(:,2));
```

```
[vert_d_calc, ~]= find(Point_calc.Location(:,2)==limiteinf_calc);
```

```
vertice_dist_calc = sogg.CA.V(vert_d_calc,:);
```

```
vertice_dist_calc_proj= projPointOnPlane (vertice_dist_calc,plane);
```

```
Hg_CA_inf = distancePoints3d(vertice_dist_calc, vertice_dist_calc_proj);
```

```
lineCA_inf= createLine3d(vertice_dist_calc,vertice_dist_calc_proj);
```

```
%ASTRAGALO 12
```

```
n_talo = createLine3d(c_ta, PD_anat(1),PD_anat(2),PD_anat(3)); %linea dal centroide in direzione normale al piano d'appoggio(ovvero PD anatomico)
```

```
pnt_talo = projPointOnLine3d(sogg.TA.V, n_talo);
```

```
Point_talo = pointCloud(pnt_talo);
```

```
limiteinf_talo = min(Point_talo.Location(:,2));
```

```
[vert_d_talo, ~]= find(Point_talo.Location(:,2)==limiteinf_talo);
```

```
vertice_dist_talo = sogg.TA.V(vert_d_talo,:);
```

```
vertice_dist_talo_proj= projPointOnPlane (vertice_dist_talo,plane);
```

```
Hg_TA_inf = distancePoints3d(vertice_dist_talo, vertice_dist_talo_proj);
```

```
lineTA_inf= createLine3d(vertice_dist_talo,vertice_dist_talo_proj);
```

### %NAVICOLARE 2

```
n_navi = createLine3d(c_na, PD_anat(1),PD_anat(2),PD_anat(3)); %linea dal centroide in direzione  
normale al piano d'appoggio(ovvero PD anatomico)
```

```
pnt_navi = projPointOnLine3d(sogg.NA.V, n_navi);
```

```
Point_navi = pointCloud(pnt_navi);
```

```
limiteinf_navi = min(Point_navi.Location(:,2));
```

```
[vert_d_navi, ~]= find(Point_navi.Location(:,2)==limiteinf_navi);
```

```
vertice_dist_navi = sogg.NA.V(vert_d_navi,:);
```

```
vertice_dist_navi_proj= projPointOnPlane (vertice_dist_navi,plane);
```

```
Hg_NA_inf = distancePoints3d(vertice_dist_navi, vertice_dist_navi_proj);
```

```
lineNA_inf= createLine3d(vertice_dist_navi,vertice_dist_navi_proj);
```

### %CUNEIFORME MEDIALE 3

```
n_cm = createLine3d(c_cm, PD_anat(1),PD_anat(2),PD_anat(3)); %linea dal centroide in direzione  
normale al piano d'appoggio(ovvero PD anatomico)
```

```
pnt_cm = projPointOnLine3d(sogg.CM.V, n_cm);
```

```
Point_cm = pointCloud(pnt_cm);
```

```
limiteinf_cm = min(Point_cm.Location(:,2));
```

```
[vert_d_cm, ~]= find(Point_cm.Location(:,2)==limiteinf_cm);
```

```
vertice_dist_cm = sogg.CM.V(vert_d_cm,:);
```

```
vertice_dist_cm_proj= projPointOnPlane (vertice_dist_cm,plane);
```

```
Hg_CM_inf = distancePoints3d(vertice_dist_cm, vertice_dist_cm_proj);
```

```
line_CM_inf= createLine3d(vertice_dist_cm,vertice_dist_cm_proj);
```

#### %CUNEIFORME INTERMEDIO 4

```
n_ci = createLine3d(c_ci, PD_anat(1),PD_anat(2),PD_anat(3)); %linea dal centroide in direzione  
normale al piano d'appoggio(ovvero PD anatomico)
```

```
pnt_ci = projPointOnLine3d(sogg.CI.V, n_ci);
```

```
Point_ci = pointCloud(pnt_ci);
```

```
limiteinf_ci = min(Point_ci.Location(:,2));
```

```
[vert_d_ci, ~]= find(Point_ci.Location(:,2)==limiteinf_ci);
```

```
vertice_dist_ci = sogg.CI.V(vert_d_ci,:);
```

```
vertice_dist_ci_proj= projPointOnPlane (vertice_dist_ci,plane);
```

```
Hg_CI_inf = distancePoints3d(vertice_dist_ci, vertice_dist_ci_proj);
```

```
line_CI_inf= createLine3d(vertice_dist_ci,vertice_dist_ci_proj);
```

#### %CUNEIFORME LATERALE 5

```
n_cl = createLine3d(c_cl, PD_anat(1),PD_anat(2),PD_anat(3)); %linea dal centroide in direzione  
normale al piano d'appoggio(ovvero PD anatomico)
```

```
pnt_cl = projPointOnLine3d(sogg.CL.V, n_cl);
```

```
Point_cl = pointCloud(pnt_cl);
```

```
limiteinf_cl = min(Point_cl.Location(:,2));
```

```
[vert_d_cl, ~]= find(Point_cl.Location(:,2)==limiteinf_cl);
```

```
vertice_dist_cl = sogg.CL.V(vert_d_cl,:);
```

```

vertice_dist_cl_proj= projPointOnPlane (vertice_dist_cl,plane);

Hg_CL_inf = distancePoints3d(vertice_dist_cl, vertice_dist_cl_proj);

line_CL_inf= createLine3d(vertice_dist_cl,vertice_dist_cl_proj);

%CUBOIDE 6

n_cubo = createLine3d(c_cu, PD_anat(1),PD_anat(2),PD_anat(3));

pnt_cubo = projPointOnLine3d(sogg.CU.V, n_cubo);

Point_cubo = pointCloud(pnt_cubo);

limiteinf_cubo = min(Point_cubo.Location(:,2));

[vert_d_cubo, ~]= find(Point_cubo.Location(:,2)==limiteinf_cubo);

vertice_dist_cubo = sogg.CU.V(vert_d_cubo,:);

vertice_dist_cubo_proj= projPointOnPlane (vertice_dist_cubo,plane);

Hg_CU_inf = distancePoints3d(vertice_dist_cubo, vertice_dist_cubo_proj);

lineCU_inf= createLine3d(vertice_dist_cubo,vertice_dist_cubo_proj);

%METATARSO 1

n_meta1 = createLine3d(c_m1, PD_anat(1),PD_anat(2),PD_anat(3));

pnt_meta1 = projPointOnLine3d(sogg.M1.V, n_meta1);

Point_meta1 = pointCloud(pnt_meta1);

limiteinf_meta1 = min(Point_meta1.Location(:,2));

```

```

[vert_d_meta1, ~]= find(Point_meta1.Location(:,2)==limiteinf_meta1);

vertice_dist_meta1 = sugg.M1.V(vert_d_meta1,:);

vertice_dist_meta1_proj= projPointOnPlane (vertice_dist_meta1,plane);

Hg_M1_inf = distancePoints3d(vertice_dist_meta1, vertice_dist_meta1_proj);

lineM1_inf= createLine3d(vertice_dist_meta1,vertice_dist_meta1_proj);

```

### %METATARSO 2

```

n_meta2 = createLine3d(c_m2, PD_anat(1),PD_anat(2),PD_anat(3));

pnt_meta2 = projPointOnLine3d(sogg.M2.V, n_meta2);

Point_meta2 = pointCloud(pnt_meta2);

limiteinf_meta2 = min(Point_meta2.Location(:,2));

[vert_d_meta2, ~]= find(Point_meta2.Location(:,2)==limiteinf_meta2);

vertice_dist_meta2 = sugg.M2.V(vert_d_meta2,:);

vertice_dist_meta2_proj= projPointOnPlane (vertice_dist_meta2,plane);

Hg_M2_inf = distancePoints3d(vertice_dist_meta2, vertice_dist_meta2_proj);

lineM2_inf= createLine3d(vertice_dist_meta2,vertice_dist_meta2_proj);

```

### %METATARSO 3

```

n_meta3 = createLine3d(c_m3, PD_anat(1),PD_anat(2),PD_anat(3));

pnt_meta3 = projPointOnLine3d(sogg.M3.V, n_meta3);

```

```

Point_meta3 = pointCloud(pnt_meta3);

limiteinf_meta3 = min(Point_meta3.Location(:,2));

[vert_d_meta3, ~]= find(Point_meta3.Location(:,2)==limiteinf_meta3);

vertice_dist_meta3 = sogg.M3.V(vert_d_meta3,:);

vertice_dist_meta3_proj= projPointOnPlane (vertice_dist_meta3,plane);

Hg_M3_inf = distancePoints3d(vertice_dist_meta3, vertice_dist_meta3_proj);

lineM3_inf= createLine3d(vertice_dist_meta3,vertice_dist_meta3_proj);

%METATARSO 4

n_meta4 = createLine3d(c_m4, PD_anat(1),PD_anat(2),PD_anat(3));

pnt_meta4 = projPointOnLine3d(sogg.M4.V, n_meta4);

Point_meta4 = pointCloud(pnt_meta4);

limiteinf_meta4 = min(Point_meta4.Location(:,2));

[vert_d_meta4, ~]= find(Point_meta4.Location(:,2)==limiteinf_meta4);

vertice_dist_meta4 = sogg.M4.V(vert_d_meta4,:);

vertice_dist_meta4_proj= projPointOnPlane (vertice_dist_meta4,plane);

Hg_M4_inf = distancePoints3d(vertice_dist_meta4, vertice_dist_meta4_proj);

lineM4_inf= createLine3d(vertice_dist_meta4,vertice_dist_meta4_proj);

%METATARSO 5

```



```

n_meta5 = createLine3d(c_m5, PD_anat(1),PD_anat(2),PD_anat(3));

pnt_meta5 = projPointOnLine3d(sogg.M5.V, n_meta5);

Point_meta5 = pointCloud(pnt_meta5);

limiteinf_meta5 = min(Point_meta5.Location(:,2));

[vert_d_meta5, ~]= find(Point_meta5.Location(:,2)==limiteinf_meta5);

vertice_dist_meta5 = sogg.M5.V(vert_d_meta5,:);

vertice_dist_meta5_proj= projPointOnPlane (vertice_dist_meta5,plane);

Hg_M5_inf = distancePoints3d(vertice_dist_meta5, vertice_dist_meta5_proj);

lineM5_inf= createLine3d(vertice_dist_meta5,vertice_dist_meta5_proj);

%% Script per creare un secondo punto sul calcagno

%%Faccio un controllo prima di eseguire lo script,

%%a differenza se l'STL in ingresso è PRE0 o POST1 vanno eseguiti calcoli

%%diversi. Uso TF per capirlo, se è uguale a 1 è preoperatorio viceversa è 0.

if (TF==1)

if (20.0 < Hg_CM_inf && Hg_CM_inf < 22.0) && (11.0 < Hg_CA_inf && Hg_CA_inf < 12.0)
&& (18.0 < Hg_CU_inf && Hg_CU_inf < 19.0)

punto2=[vertice_dist_talo(1,1)-12,vertice_dist_navi(1,2)-4.2,vertice_dist_calc(1,3)-2];

%1 Piede

elseif (15.0 < Hg_CM_inf && Hg_CM_inf < 16.0) && (6.5 < Hg_CA_inf && Hg_CA_inf < 7.5)
&& (17.0 < Hg_CU_inf && Hg_CU_inf < 18.0)

```

```

punto2=[vertice_dist_talo(1,1)-12,vertice_dist_navi(1,2)+1.5,vertice_dist_calc(1,3)];

%2 Piede

elseif(12.0 < Hg_CM_inf && Hg_CM_inf < 13.0) && (11.5 < Hg_CA_inf && Hg_CA_inf < 12.5)
&& (19.5 < Hg_CU_inf && Hg_CU_inf < 20.5)

    punto2=[vertice_dist_talo(1,1)-12,vertice_dist_navi(1,2)+9.2,vertice_dist_calc(1,3)];

    %3 Piede

elseif(15.5 < Hg_CM_inf && Hg_CM_inf < 16.5) && (10.5 < Hg_CA_inf && Hg_CA_inf < 11.5)
&& (19.5 < Hg_CU_inf && Hg_CU_inf < 20.5)

    punto2=[vertice_dist_talo(1,1)-10,vertice_dist_navi(1,2)+3.4,vertice_dist_calc(1,3)+3];

    %4 Piede

else

    punto2=[vertice_dist_talo(1,1)-13,vertice_dist_navi(1,2)+1,vertice_dist_calc(1,3)-4];

    %5 Piede

end

end

if (TF==0)

    if(Hg_CU_inf < Hg_CA_inf)

        %5 piede

        punto2=[vertice_dist_talo(1,1)-10,vertice_dist_talo(1,2)-24,vertice_dist_calc(1,3)];

    elseif(Hg_CU_inf/2 >= Hg_CA_inf)

        %2 piede

        punto2=[vertice_dist_talo(1,1)-10,vertice_dist_talo(1,2)-23,vertice_dist_calc(1,3)];

    elseif(Hg_CU_inf > Hg_CM_inf)

```

```

%3 piede

punto2=[vertice_dist_talo(1,1)-15,vertice_dist_talo(1,2)-13,vertice_dist_calc(1,3)];

elseif(Hg_CU_inf - Hg_CA_inf <= 3.5)

%1 piede

punto2=[vertice_dist_talo(1,1)-12,vertice_dist_talo(1,2)-23,vertice_dist_calc(1,3)-15];

else

%4 piede

punto2=[vertice_dist_talo(1,1)-15,vertice_dist_talo(1,2)-20,vertice_dist_calc(1,3)];

end

end

%Creo due punti in più per correttezza

punto21= (vertice_dist_ci(1,2)-punto2(1,2))/2;

punto20=[vertice_dist_navi(1,1)+1,vertice_dist_ci(1,2)-punto21,vertice_dist_ci(1,3)];

%Parte retro

matrixRetro=[punto1;punto2;punto98;punto99;punto3;punto7;punto13;punto14;punto20];

xx = matrixRetro(:,1); yy = matrixRetro(:,2); zz = matrixRetro(:,3);

[K1,Volume1]=convhull(xx,yy,zz);

trisurf(K1,xx,yy,zz,'Facecolor','cyan','FaceAlpha',0.2); axis equal;

```

```
Vol1 = num2str(Volume1(1,1));
```

```
hold on
```

```
%Parte centrale
```

```
matrixMeso=[punto20;punto7;punto3;punto13;punto14;punto4;punto15;punto5;punto6;punto16;punto17];
```

```
xx = matrixMeso(:,1); yy = matrixMeso(:,2); zz = matrixMeso(:,3);
```

```
[K1,Volume2]=convhull(xx,yy,zz);
```

```
trisurf(K1,xx,yy,zz,'Facecolor','green','FaceAlpha',0.2); axis equal;
```

```
Vol2 = num2str(Volume2(1,1));
```

```
hold on
```

```
%Parte Avanzata
```

```
matrixAvan=[punto7;punto4;punto5;punto6;punto8;punto9;punto10;punto11;punto12;punto14;punto15;punto16;punto17];
```

```
xx = matrixAvan(:,1); yy = matrixAvan(:,2); zz = matrixAvan(:,3);
```

```
[K1,Volume3]=convhull(xx,yy,zz);
```

```
trisurf(K1,xx,yy,zz,'Facecolor','blue','FaceAlpha',0.1); axis equal;
```

```
Vol3 = num2str(Volume3(1,1));
```

```
%Parte di disturbo
```

```
matrixDist=[punto7;punto6;punto5;punto4;punto14;punto15;punto16;punto17];
```

```
xx = matrixDist(:,1); yy = matrixDist(:,2); zz = matrixDist(:,3);
```

```
[K1,Volume4]=convhull(xx,yy,zz);
```

```
trisurf(K1,xx,yy,zz,'Facecolor','black'); axis equal;
```

```
Vol4 = num2str(Volume4(1,1));
```

```
%Sottraggo la parte di disturbo
```

```
Vol5 = (str2double(Vol3) - str2double(Vol4));
```

```
title ([num2str(Vol1), ' mm^3',' ' , num2str(Vol2), ' mm^3',' ' , num2str(Vol5), ' mm^3',',,])
```

```
matrix1=[punto1;punto2;punto98;punto99;punto3;punto13;punto14;punto7;punto4;punto15;punto  
6;punto16;punto17;punto5;punto8;punto9;punto10;punto11;punto12];
```

```
xx = matrix1(:,1); yy = matrix1(:,2); zz = matrix1(:,3);
```

```
[K1,Volume]=convhull(xx,yy,zz);
```

```
trisurf(K1,xx,yy,zz,'Facecolor','red','FaceAlpha',0.2); axis equal;
```

```
Vol6 = (str2double(Vol1) + str2double(Vol2) + Vol5);
```

```
title(['il volume totale calcolato è quindi:' , num2str(Vol6), ' mm^3'])
```

# BIBLIOGRAFIA

- [1] Arangio G., Filippi MV., Colonna M. e Postacchini F. (2001). Piede calcaneo-valgo congenito: analisi radiografica di 51 pazienti. *Radiologia pediatrica*.
- [2] Berlet GC., Hyer CF., Lee TH. e Philbin TM. (2011). Revisione dei concetti attuali: deformità del piede piatto acquisita dall'adulto. *Foot & Ankle International*.
- [3] Chang HW., Tsai CC., Wu YL., Wu JW., Chen SH. e Chen CH. (2018). Confronto della distribuzione dinamica della pressione plantare tra piedi piatti e piedi normali utilizzando una piattaforma di pressione plantare. *Giornale dell'Associazione medica di Formosa*.
- [4] Chen JY., Lee WC., Shih JT. e Chen CH. (2019). Gli effetti dell'artroeresi articolare sub talare con l'impianto bio assorbibile nei bambini con piede piatto flessibile: uno studio retrospettivo. *Giornale di chirurgia ortopedica e ricerca*.
- [5] Hsieh HM., Wu CC., Lee WC., Chen CH., Liu YJ. e Shen HC. (2020). Esiti a lungo termine dell'artrodesi sub talare per la deformità del piede piatto acquisita in stadio II nell'adulto. *Disturbi muscoloscheletrici BMC*.
- [6] Kitaoka HB., Luo ZP., Growney ES., Berglund LJ., An KN. (1997). Proprietà materiali dell'aponeurosi plantare. *Piede Caviglia Int.*
- [7] Lin CJ., Lai KA., Kuan TS., Chou YL. (1995). Correlazione tra indice dell'arco e impronte a Taiwan. *Piede Caviglia Int.*
- [8] Luk KDK, Leong JCY, Chow SP (1990) L'effetto del supporto dell'arco sulla curvatura sagittale della colonna vertebrale. *Il Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume*.
- [9] Murley GS., Landorf KB. e Menz HB. (2010). Le ortesi del piede cambiano l'attività muscolare degli arti inferiori nei piedi ad arco piatto verso un modello osservato nei piedi ad arco normale? *Biomeccanica clinica*.
- [10] Sarrafian SK. (1983). *Anatomia del piede e della caviglia: descrittiva, topografica, funzionale*. Filadelfia, PA: JB Lippincott Company.
- [11] Pascual Huerta J, Bobadilla Mendoza M, Rodriguez-Merchan EC. Aggiornamento sul piede piatto: gestione chirurgica della deformità del piede piatto acquisita nell'adulto. *EFORT Open Rev*.

[12] Demirag B, Aykut US, Kose O, Kayaalp ME, Cetik O. Confronto degli esiti radiologici dell'osteotomia calcaneare e dell'allungamento della colonna laterale per il trattamento della deformità del piede piatto acquisita nell'adulto.

[13] J Orthop Surg Res. 2021 Jan 28;16(1):97. DOI: 10.1186/s13018-020-02173-8. PMID: 33509222; PMCID: PMC7841678.

[14] Canella C, Demondion X, Moineau G, Grimaldi A, Marchand AJ, Guillin R, Durieux MH. Gli effetti di un programma di esercizi di stretching specifico della fascia plantare sul dolore, la funzione e la biomeccanica in pazienti con fascite plantare cronica: una serie di casi.

[15] Lee JH, Sung KH, Chung CY, Cho BC, Moon SJ, Park MS. Risultati clinici e cambiamenti radiologici dopo la medializzazione dell'osteotomia calcaneare con procedure aggiuntive per piede piatto flessibile. *Piede Caviglia Surg.* 2021 Gennaio 14.

[16] Sarrafian SK. *Anatomia del Piede e della Caviglia: Descrittiva, Topografica, Funzionale*".