Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Biomedica

PLANTARI INNOVATIVI PER IL MIGLIORAMENTO DELLA PRESTAZIONE ATLETICA

Relatore:

PROF. GAUDENZIO MENEGHESSO

Laureanda:

GIUDITTA ROMANO

2080802

Anno Accademico 2024/2025

Data di laurea 24/09/2025

Indice

INDICE.....2

ABSTRACT.....4

INTRODUZIONE.....5

CAPITOLO 1

IL PIEDE.....6

1.1. Anatomia e conformazione.....6

1.1.1. Struttura scheletrica.....7

1.1.2. Struttura funzionale.....9

1.2. Architettura del piede e pressioni plantari.....10

1.2.1. Possibili problematiche del piede.....11

1.2.2. Problemi articolari e patologie.....12

1.3. Analisi biomeccanica del movimento.....13

1.3.1. 'Gait cylce', il ciclo del passo.....14

1.3.2. Le tipologie d'appoggio.....15

CAPITOLO 2

TECNOLOGIE A CONFRONTO PER L'ANALISI DEL PASSO.....19

2.1. Piattaforme di pressione.....21

2.2. Strutture plantari e dispositivi inseribili nelle calzature.....21

2.2.1. Evoluzione dei plantari negli anni.....22

CAPITOLO 3

ARCHITETTURA E SVILUPPO DEI PLANTARI.....24

3.1. Componenti elettronici per i plantari.....26

3.1.1. Microcontrollore.....26

3.1.2. Sensori di forza resistivi.....27

3.1.3. Circuito di condizionamento.....29

3.1.4. Sistema di alimentazione.....31

3.1.5. Sistema per la visualizzazione dei dati.....33

3.2. Come si realizza il sistema.....34

3.2.1. Hardware.....35

3.2.2. Software.....37

CAPITOLO 4

IL COSTO DELL'INNOVAZIONE: L'IMPATTO ECONOMICO DEI PLANTARI ELETTRONICI.....39

4.1. Analisi dei costi.....39

4.1.1 Oneri produttivi indiretti.....40

4.1.2. Oneri produttivi diretti.....40

CAPITOLO 5

APPLICAZIONI PRATICHE E PROSPETTIVE DI SVILUPPO FUTURO.....43

5.1. Prodotti SENSOR MEDICA 43

5.1.1. Plantari FlexInFit.....43

5.1.2. Pedane FreeMed.....44

5.2. Plantari Pedelab Active.....45

5.3. X4 Intelligent Insole System.....46

5.4. Salted Smart Insoles.....48

5.5. Prospettive per lo sviluppo futuro.....49

CONCLUSIONI.....51

RINGRAZIAMENTI.....52

BIBLIOGRAFIA.....53

ABSTRACT

Plantar pressure is the force exerted on the ground or supporting surface by the sole of the foot, which bears the entire weight of the human body. The moment of impact is of fundamental importance in preventing injuries or treating and resolving possible inflammation resulting from prolonged periods of incorrect foot positioning. This abstract is written from the perspective of a company wanting to initiate a design and implementation project and it evaluates the viability of a device that delivers the end-to-end solution for detecting the pressure exerted by the foot, both in the static phase when standing and in the dynamic phase when walking or running. Given that it is an everyday activity, primary attention will be directed towards those who wish to focus in on the way they walk; thus, by walking correctly, their quality of life and personal health will improve. In particular, the intention is to directly approach all athletes who perform more intense and concentrated activities on a daily basis, thereby subjecting their feet and entire physical structure to greater stress. From this scope, it will be possible to create both an electronic insole, which can be comfortably inserted into shoes and used while practicing sport, and actual footplates that are able to detect the plantar pressure exerted step by step on the ground. In this way, all the information and data needed to create orthotics for daily wear that alleviate and reduce any problems during the foot support phase can be collected. The thesis begins with an analysis of the bone and muscle-tendon structure of the foot to understand its anatomical nature, before moving on to analyze how technological instruments and electronic equipment operate and detect how the foot interacts during support. Finally, the thesis concludes with a concise but comprehensive cost analysis, and presentation of some models already on the market, including some ideas for improving the functions of this highly innovative technology.

INTRODUZIONE

I plantari elettronici sono dispositivi molto utili per lo studio e la conoscenza della pressione che esercitano i piedi sul terreno. Infatti, l'intero peso corporeo è completamente appoggiato sulle piante dei piedi sia quando il soggetto è in piedi (fase statica), sia quando è in movimento (fase dinamica). Per questo, capire come il carico si ripartisce nelle varie zone del piede, permette di conoscere quali siano i punti di appoggio principali per ciascun soggetto e quali siano le zone particolarmente sollecitate nel momento in cui sono i piedi a dare supporto all'intera figura.

Un appoggio scorretto o alterato ha un'influenza alquanto negativa poiché si ripete ad ogni passo; quindi, il danno è moltiplicato esponenzialmente ad ogni movimento. Ciò porta a possibili infiammazioni a livello articolare e tendineo per tutta la struttura sovrastante e sorretta dai piedi: sono coinvolte principalmente caviglie, ginocchia e anche.

La problematica riguarda in generale tutti i soggetti ma in modo particolare gli atleti che sollecitano costantemente le proprie articolazioni nel corso dell'attività sportiva. In questo testo, l'attenzione è rivolta in particolare alla realizzazione di solette o di un'apparecchiatura specifica che possa rilevare come la pressione si distribuisce e quali sono le zone d'appoggio sollecitate in modo scorretto o in modo eccessivo.

Al momento, sono disponibili o delle solette elettroniche che possono essere inserite all'interno della calzatura o delle pedane baropodometriche per l'acquisizione dei dati in fase dinamica. Le prime possono essere utilizzate tutti i giorni e direttamente in loco quindi al campo sportivo, per camminare in strada o ovunque si eserciti la propria attività; le pedane sono invece più limitate all'utilizzo in laboratorio e non all'esterno.

Immaginando di essere un'azienda che vuole realizzare questo tipo di tecnologia, bisogna analizzare diversi aspetti. Si partirà quindi dall'analisi del piede e della sua conformazione, per poi passare ad una descrizione più completa delle strutture in questione, considerando anche i costi di creazione dei dispositivi, fino ad arrivare a proporre degli esempi di modelli già presenti sul mercato e capire dove si può invece migliorare.

CAPITOLO 1. *Il piede*

La progettazione di plantari elettronici destinati al miglioramento della performance atletica richiede una conoscenza preliminare dettagliata dell'anatomia e della biomeccanica del piede umano. È dunque fondamentale analizzare la struttura osteoarticolare e muscolo-tendinea, nonché le dinamiche di distribuzione delle forze durante il ciclo del passo. Tali conoscenze costituiscono la base per comprendere le principali alterazioni funzionali e le patologie associate a disallineamenti o sovraccarichi meccanici. Solo attraverso una comprensione sistemica dei meccanismi fisiologici e patologici del piede è possibile sviluppare dispositivi sensorizzati in grado di monitorare, ottimizzare e correggere l'appoggio plantare in tempo reale, contribuendo così sia alla prevenzione degli infortuni che al potenziamento delle prestazioni motorie.

1.1 Anatomia e conformazione

I piedi rappresentano la struttura anatomica distale dell'arto inferiore del corpo umano e il loro ruolo è essenziale per il nostro organismo poiché svolgono numerose funzioni fondamentali sia in fase statica che dinamica.

In posizione eretta sono molto importanti e hanno il ruolo di:

- *supportare e scaricare a terra l'intero peso corporeo;*
- *garantire il mantenimento dell'equilibrio, collaborando con il sistema neuromuscolare nel controllo fine delle oscillazioni posturali.*

Allo stesso modo, in fase di deambulazione hanno due incarichi distinti tra loro ma complementari:

- **Funzione passiva**: Ammortizzare, assorbendo l'energia derivante dall'impatto con il terreno nelle fasi iniziali del passo, limitando e riducendo le sollecitazioni alle articolazioni sovrastanti;

- **Funzione attiva**: Trasmettere le forze propulsive interne verso il suolo attraverso l'azione coordinata della muscolatura intrinseca ed estrinseca, favorendo l'avanzamento del corpo nella fase di spinta, consentendo così la camminata, il salto e la corsa.

Questa duplice natura, caratterizzata da capacità adattative e propulsive, è possibile grazie alla complessa conformazione del piede, che permette una transizione efficiente e funzionalmente indispensabile tra rigidità e flessibilità durante il passo. [1] [3]

1.1.1 Struttura scheletrica

Lo struttura scheletrica del piede è composta da 26 ossa, che si suddividono a loro volta in tre regioni principali: tarso, metatarso e falangi (Figura 1.1.1).

- **TARSO**

  Il tarso è composto da sette ossa brevi, a loro volta organizzate in due file:

  Nella fila prossimale si trovano il talo (**astragalo**) e il calcagno che costituisce il tallone, il quale rappresenta uno dei principali punti di contatto con il terreno nella fase iniziale di rullata del piede.

  La fila distale include il navicolare, il cuboide e i tre cuneiformi, mediale, intermedio e laterale.

- **METATARSO**

  Il metatarso è composto da cinque ossa lunghe, che possono essere numerate da 1 a 5 in senso medio laterale. Ciascun metatarso è costituito da base prossimale, corpo centrale e testa distale, che si articola nelle falangi.

- **FALANGI**

  Le ossa digitali possono essere suddivise in falangi prossimali, intermedie e distali. Considerando ogni dito, l'alluce è composto da due falangi, quella prossimale e quella distale, mentre dal secondo al quinto dito, sono presenti tre falangi.

Le articolazioni interfalangee, insieme alle articolazioni metatarso-falangee, permettono la flessione e l'estensione delle dita, consentendo e contribuendo all'equilibrio del piede sulle superfici irregolari. [1]

Sono infine presenti 33 articolazioni (tra cui le intertarsiche, intermetatarsiche e interfalangee) che si uniscono con inserzioni di muscoli, tendini e legamenti, quindi con le strutture muscolari interne al piede.

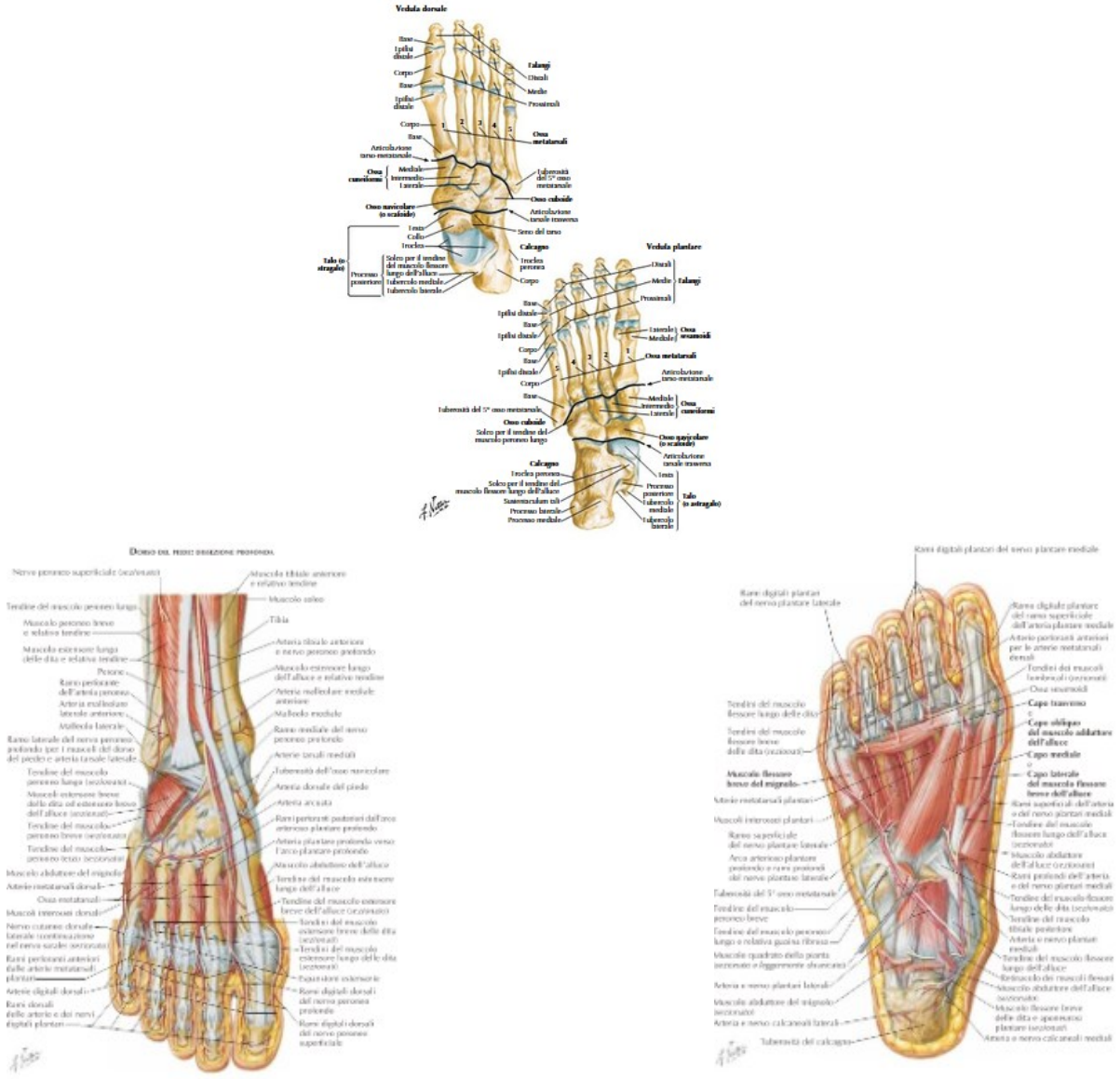


Figura 1.1.1. Struttura scheletrica e muscolo-tendinea del piede, visione plantare e dorsale [4]

1.1.2 Struttura funzionale

Sulla base delle funzionalità elencate, possiamo suddividere il piede in tre aree di interesse differenti ma connesse e comunicanti tra loro (Figura 1.1.2).

Esse si susseguono in senso prossimo-distale:

- **RETROPIEDE**

  Costituito da astragalo e calcagno, consente la connessione tra gamba e piede tramite l'articolazione tibio-tarsica. Risulta fondamentale per modulare l'assorbimento del carico proveniente dal peso corporeo attraverso la pronazione e garantendo la stabilità mediante la supinazione.

- **MESOPIEDE**

  Costituito da scafoide, cuboide e dai tre cuneiformi, i quali compongono l'arco del piede, che ha l'importante ruolo di ammortizzatore. Le articolazioni che lo compongono consentono la rotazione del piede; il mesopiede è in grado di trasmettere le forze tra retropiede ed avampiede, fungendo da elemento di interconnessione e modulazione.

- **AVAMPIEDE**

  Costituito da cinque ossa metatarsali, che compongono il metatarso e dalle relative falangi (due per l'alluce, tre per le altre dita). L'avampiede è in primo piano nella fase finale di rullata del piede in cui si comporta da struttura propulsiva, convertendo l'energia muscolare e tendinea in spinta meccanica necessaria alla progressione del movimento e, ancor di più, del salto e della corsa.

Figura 1.1.2. Suddivisione del piede in tre aree funzionali [6]

1.2 Architettura del piede e pressioni plantari

Osservandolo dall'esterno, il piede ha un dorso, parte superiore, e una pianta, parte inferiore. Quest'ultima, non aderisce del tutto al terreno, ma presenta una curvatura ad arco, che può essere più o meno marcata e che prende il nome di *volta plantare*. L'arco plantare è in grado di sorreggere l'intera struttura corporea e, per farlo, è necessario che il peso venga distribuito adeguatamente su di esso. Questo peso risulta essere significativamente grande se paragonato ad una superficie così ristretta dell'arco e su cui si esercita una grande *pressione plantare*. Infatti, il principio di funzionamento è molto simile a quello di un arco architettonico, in cui le forze verticali sono trasformate in forze laterali. Perciò, la volta plantare si adatta ad ogni superficie, riequilibrando la suddivisione del peso in base al terreno con cui si trova a contatto in posizione eretta e massimizzando la spinta propulsiva dopo ciascun appoggio in fase di deambulazione. [2] [3]

È possibile individuare tre archi plantari (Figura 1.2.1 e Figura 1.2.2):

- *Arco longitudinale interno*
- *Arco longitudinale esterno*
- *Arco trasversale*

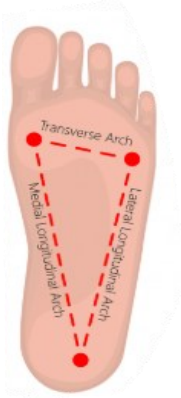


Figura 1.2.1. Archi plantari [7]

Uno scorretto equilibrio ed una errata distribuzione del peso altera la morfologia del piede e crea risentimento per tutte le articolazioni sovrastanti, in particolare caviglie e ginocchia che devono essere allineate con il piede per lavorare evitando infiammazioni e dolori.

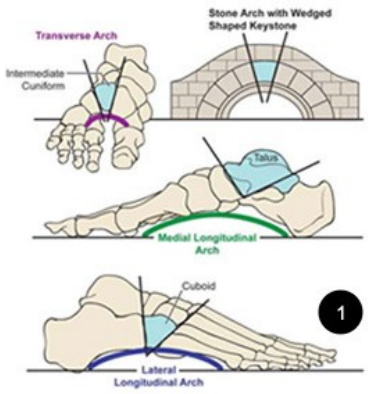


Figura 1.2.2. Individuazione degli archi plantari [8]

1.2.1 Possibili problematiche del piede

Come accennato poco fa, la pressione plantare esercitata dal corpo deve essere ben sorretta dalla volta plantare. In caso questo non capiti, ci sono due possibili problematiche derivanti: la prima di tipo morfologico; quindi, legata ad un cambiamento nella forma dell'arco plantare, con conseguenze muscolari e articolari; la seconda di tipo patologico, che può coinvolgere i nervi o i tessuti circostanti alle dita del piede quando vengono sottoposti a carichi eccessivi e scorrettamente supportati. [9]

Nel primo caso, la volta plantare altera la sua forma e si individuano dei cambiamenti dalla forma del piede classica (Figura 1.2.1.1):

- **PIEDE PIATTO**
  Si verifica quando l'arco cede in parte o completamente lasciando ricadere su di sé l'intero peso corporeo; può essere causato da una debolezza di muscoli o legamenti volti al sostegno dell'arco stesso.
- **PIEDE CAVO**
  Si verifica quando l'arco plantare è più accentuato; può essere causato da fattori congeniti ed ereditari, da traumi subiti oppure ad un utilizzo di calzature scorrette per un lasso di tempo eccessivamente prolungato.

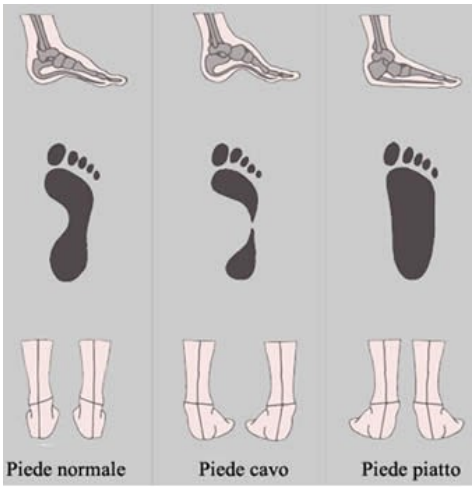


Figura 1.2.1.1. Rappresentazione degli appoggi e delle conseguenze per le articolazioni delle caviglie in caso di piede piatto o piede cavo [9]

Nel secondo caso, si alterano le funzioni del piede, sia per difetti congeniti sia per cattive abitudini posturali o atteggiamenti inadeguati in fase di deambulazione mantenuti per settimane o mesi. Si individuano ad esempio:

- **NEUROMA DI MORTON**
  Patologia che porta all'ispessimento di un tratto del nervo plantare sensitivo che irradia terzo e quarto dito, nel momento in cui si forma tessuto fibroso in eccesso.

- **FASCITE PLANTARE**
  Patologia provocata da carichi ripetuti ed eccessivi in corrispondenza della zona arcuata del piede, la *fascia plantare*.

- **ALLUCE VALGO**
  Patologia da cui deriva una deviazione laterale dell'alluce in direzione delle altre dita del piede.

Analizzare come si distribuiscono le pressioni plantari è, quindi, indispensabile per acquisire informazioni sulle problematiche plantari più frequenti ed è anche importantissimo per valutare se gli appoggi del piede sono corretti, sia in fase statica che dinamica. [5] [9]

A tal proposito, lo studio delle pressioni plantare si può eseguire sia considerando soggetti statici e valutandone l'equilibrio, sia considerando la fase di camminata a bassa ed alta frequenza, fino ad arrivare alla corsa, eseguendo riflessioni in ambito biomeccanico.

1.2.2 Problemi articolari e patologie

L'essere umano è un animale che quotidianamente ha la necessità di muoversi per tratti più o meno brevi. Una scorretta esecuzione della rullata del piede durante il ciclo di marcia determina un importante sovraccarico delle articolazioni sovrastanti di caviglie, ginocchia e colonna lombare dato che, in caso di appoggio non neutro, l'inadeguatezza del passo si ripete costantemente in fase di deambulazione moltiplicando esponenzialmente i possibili

danni. La maggior parte delle problematiche è associata al tipo di calzature utilizzate per tempi prolungati, perché non aderenti in maniera adeguata al piede (troppo strette o troppo larghe), oppure poiché queste accentuano gli atteggiamenti sbagliati del piede in appoggio.

I danni principali a livello articolare coinvolgono (Figura 1.2.2.1):

- **COLONNA LOMBARE**

  La colonna vertebrale presenta delle curvature fisiologiche più o meno accentuate che devono essere mantenute durante ogni movimento. L'aumento della curvatura, soprattutto in zona lombare, porta a comprimere o a disallineare le vertebre rispetto alla posizione naturale. Oltre al dolore nella zona indicata, ne deriva il rischio di un'ernia al disco, provocata dalla traslazione in avanti del peso.

- **GINOCCHIA**

  La posizione non corretta di appoggio del piede può aumentare l'angolo di flesso-estensione del ginocchio, sovraccaricando i muscoli (in particolare i *quadricipiti*) e aumentando il rischio di artrosi e usura dell'osso del ginocchio, la *rotula*.

- **CAVIGLIE**

  Le caviglie consentono la flesso-estensione del piede per cui appoggi poco adeguati, destabilizzano le caviglie e incrementano il volume di sollecitazioni ai muscoli e ai legamenti. Da ciò derivano possibili distorsioni ma anche un possibile accorciamento dei muscoli, in particolare del polpaccio, diminuendone la naturale elasticità.

Figura 1.2.2.1. Possibili problemi articolari agli arti inferiori [10]

Si possono osservare anche possibili patologie, congenite o sviluppate negli anni a causa di posizioni inadeguate per periodi prolungati.

- **ARTRITE REUMATOIDE**

  L'artrite reumatoide è una patologia infiammatoria cronica autoimmune; arriva a coinvolgere anche il piede e la caviglia provocando dolore, deformità e problemi a camminare. La regione maggiormente interessata è l'avampiede, che si irrigidisce e si irrita a livello della cute. È un disturbo degenerativo per cui serve agire subito aggiustando la calzatura con dei plantari o dei tutori che possano correggere la posizione del piede evitando l'evoluzione del problema.

- **DIABETE MELLITO**

  Il diabete mellito è una patologia cronica dovuta ad una carenza assoluta o parziale della secrezione di insulina. Gli elevati livelli di glucosio nel sangue possono portare ad alterare i nervi periferici e i vasi sanguigni; da questo ne seguono la neuropatia, quindi la diminuzione o scomparsa della sensibilità al piede, ma anche l'arteriopatia; quindi, il sangue non arriva correttamente ad irrorare i tessuti. La mancata sensibilità non consente di avvertire dolore in caso di lesioni che possono progredire in ulcere infette; nei casi più gravi si arriva anche all'amputazione dell'arto in questione. [5]

1.3 Analisi biomeccanica del movimento

In generale, la biomeccanica del movimento si occupa di comprendere e studiare il moto del corpo umano nel momento in cui viene sottoposto a forze, insieme agli effetti che ne derivano. Infatti, osservando l'origine del termine, notiamo che:

- ✓ **BIO**: Indica i sistemi biologici, gli esseri viventi.
- ✓ **MECCANICA**: Indica lo studio delle forze applicate ad un corpo e delle relative conseguenze.

Per esaminare in modo completo un movimento, si può compiere un'indagine *statica*, concentrandosi sullo studio dell'equilibrio del corpo sottoposto a forze esterne, *cinematica*, ponendo l'attenzione sulle posizioni, le velocità e le accelerazioni del corpo, trascurando le forze da cui derivano le variazioni di posizione e di velocità, e infine *dinamica*, approfondendo il movimento e lo stretto legame con le forze che lo generano.

È proprio per questa ragione, che risulta indispensabile analizzare il movimento quando ci si approccia al moto di deambulazione, focalizzando l'interesse primo verso il 'gait cylce', quindi apprendendo gli elementi cardinali del ciclo del passo, poi verso gli appoggi possibili nel momento in cui il piede entra in contatto con il terreno.

1.3.1. 'Gait cylce', il ciclo del passo

Il ciclo del passo (*gait cylce*), non è altro che l'intervallo di tempo che intercorre tra due appoggi successivi di uno stesso piede sul terreno in fase di deambulazione; quest'ultima prevede una serie di movimenti degli arti, del bacino e del tronco, per garantire lo spostamento in avanti del centro di gravità del corpo, tramite rotazioni e traslazioni delle articolazioni e dei segmenti ossei. Durante la camminata, si alterna il moto di propulsione dei due arti inferiori, permettendo, ad ogni passo, il temporaneo spostamento del centro di pressione da un piede all'altro, per mantenere un equilibrio anche in fase dinamica. [11]

Perciò, il ciclo del passo può essere suddiviso in due fasi primarie (Figura 1.3.1.1):

- **FASE DI APPOGGIO**

  Anche conosciuta come fase di *stance,* include il 60% del ciclo e comprende l'intervallo di tempo in cui il piede è a contatto con il terreno.

- **FASE DI OSCILLAZIONE**

  Nota anche come fase di *swing* copre il restante 40% del ciclo e considera la fase in cui il piede risulta sollevato rispetto al terreno.

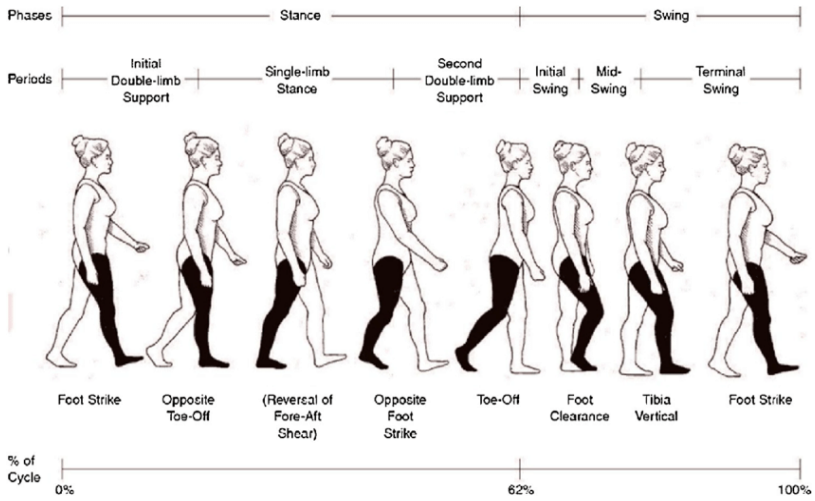


Figura 1.3.1.1. Suddivisione del ciclo del passo nelle due fasi principali [11]

A loro volta, queste fasi possono essere suddivise in altre relative sottofasi che considerano tutti gli step che le compongono, scavando a fondo su come ciascuna di esse si dirama.

La fase di appoggio, si articola a sua volta in tre sottofasi direttamente collegate con l'area del piede coinvolta (Figura 1.3.1.2):

- **CONTATTO** *(initial contact)*

  La prima sottofase si realizza con il tallone, che viene proiettato in avanti e supporta la maggior parte del carico, nel momento in cui avviene il contatto con il terreno.

- **APPOGGIO** *(midstance)*

  Nella seconda sottofase, il piede risulta totalmente a contatto con il terreno e il peso corporeo è ripartito tra il tallone e la parte anteriore del corpo, concentrandosi quindi sulla volta plantare. È proprio in questa fase che ha importanza capire se il piede si mantenga in linea retta e non compia rotazioni verso l'interno o verso l'esterno.

- **<u>PROPULSIONE</u>**

  Nel corso della terza ed ultima fase, il piede ha la parte anteriore a contatto con il suolo in modo da imprimere la spinta necessaria per arrivare al movimento in avanzamento. Il peso si sposta sull'avampiede poiché l'arto ha superato la verticale.

Per passare dalla fase di 'stance' a quella di 'swing', è presente una fase intermedia per consentire il passaggio dall'una all'altra ed è la fase di **PRE-OSCILLAZIONE** *(o pre-swing)*: questa è la fase in cui il carico si trasferisce da un arto all'altro e prepara la fase di oscillazione per l'arto che ha appena concluso il ciclo di appoggio, avviando la flessione del ginocchio.

<u>Figura 1.3.1.2</u>. Parti del piede a contatto con il terreno nella fase di appoggio [12]

La fase di swing, si suddivide a sua volta in tre parti principali (Figura 1.3.1.3):

- **<u>OSCILLAZIONE INIZIALE</u>**

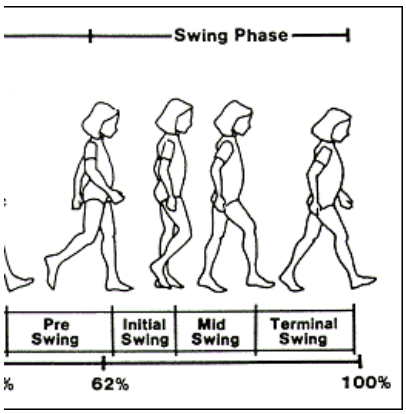
  Parte con il piede e le dita che si sollevano dal terreno finché l'arto non avanza e raggiunge una posizione parallela al piede d'appoggio. Serve che ci sia la giusta distanza tra il piede e il suolo mentre è l'altra gamba a sorreggere il carico, diventando quindi gamba portante. [10]

- **<u>OSCILLAZIONE INTERMEDIA</u>**

  Si mantiene la distanza tra piede e terreno mentre l'altra gamba è nell'ultima parte del medio appoggio; l'arto oscillante procede in avanzamento fino a quando la tibia non si trova allineata con l'arto portante.

- **<u>OSCILLAZIONE FINALE</u>**

  È il periodo che conclude la fase di oscillazione dell'arto e termina nel momento in cui il piede entra nuovamente in contatto con il terreno, garantendo il continuo ciclico della fase di deambulazione. L'altra gamba si trova alla fine della fase di carico. [12]



<u>Figura 1.3.1.3</u>. Rappresentazione della fase di oscillazione [13]

La fase di cammino avviene a bassa frequenza; alzando il ritmo si arriva alla corsa, in cui le fasi principali rimangono le stesse e se ne aggiunge una, quella di ***<u>volo o periodi 'fluttuanti'</u>***, in cui nessun piede risulta in appoggio con il terreno. Infatti, ciò che distingue la marcia dalla corsa, è proprio il fatto che nella prima si mantiene costantemente un appoggio o un contatto con il terreno, nella seconda invece si alternano fasi di appoggio con momenti in cui non vi è aderenza con il terreno. [11] [13]

Le fasi illustrate variano leggermente nel momento in cui si aumenta la velocità con cui si percorre il ciclo stesso, arrivando alla corsa a più alta frequenza, volta a percorrere una distanza nel minor tempo possibile: in questo caso, il contatto con il suolo si limita alla

parte anteriore del piede, dato che più si riduce l'intervallo di tempo in appoggio con il terreno, più la corsa risulta efficace e rapida (Figura 1.3.1.4). [14]

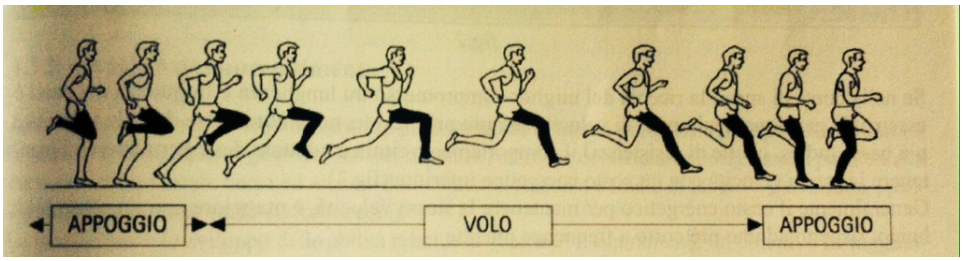


Figura 1.3.1.4. Aggiunta della fase di volo durante la corsa [14]

1.3.2 Le tipologie d'appoggio

Nel capitolo 1.2.1, son state descritte le possibili problematiche del piede: quelle legate alla morfologia del piede possono causare delle differenze nel tipo di appoggi possibili; cambia quindi la porzione di pianta del piede interessata nel contatto con il terreno. Possiamo distinguere tre tipologie differenti di appoggio [15] (Figura 1.3.2.1):

- **APPOGGIO NEUTRO o UNIVERSALE**

  Quando l'appoggio si concentra nella parte centrale del piede, il peso è correttamente distribuito sull'intera zona plantare. Ciò consente alle articolazioni di lavorare allineate con gli assi corporei, prevenendo infiammazioni articolari. Chi è dotato di appoggio neutro, deambulando disegna una linea retta ideale.

- **APPOGGIO PRONATORE**

  È solitamente più osservabile nei soggetti che hanno un piede piatto (anche se non per forza i due fattori sono conseguenti). L'appoggio pronatore porta il piede ad inclinarsi verso la regione interna del piede nel momento in cui si cammina; pertanto, il peso corporeo e quindi la maggior parte della tensione, si accentra nella parte interna del piede.

- **APPOGGIO SUPINATORE**

  Si osserva maggiormente nei soggetti con un piede cavo (anche se non obbligatoriamente i due elementi sono dipendenti tra loro). Chi ha un appoggio supinatore, tende a spostare la maggior parte del peso nella zona esterna del piede, sottoponendola alla gran parte dello sforzo. [15] [16]

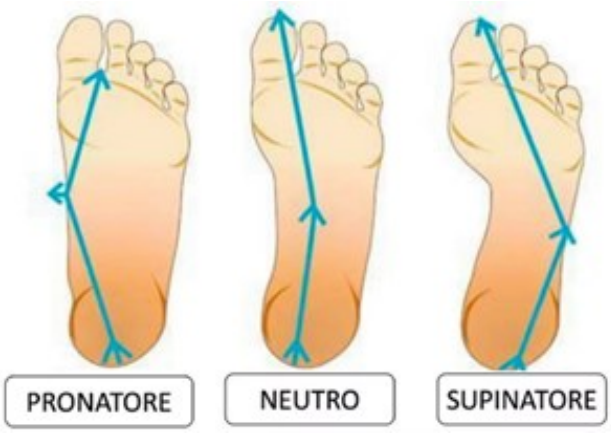


Figura 1.3.2.1. Linee di distribuzione del carico in fase di rullata del piede [16]

Terminata l'analisi anatomica e strutturale, si può ora procedere ad analizzare come migliorare e sorreggere il piede tramite dispositivi di supporto, i plantari elettronici, e capirne la tecnologia e la modalità di utilizzo.

CAPITOLO 2. *Tecnologie a confronto per l'analisi del passo*

Il piede esercita sul suolo o sulla calzatura una pressione plantare, intesa come forza per unità di superficie della pianta del piede sul piano d'appoggio (il suolo o un plantare, ad esempio). Questa pressione è dovuta al peso corporeo che grava direttamente sull'arco plantare e viene ripartita sui due piedi per svolgere qualsiasi attività in modo funzionale.

Al fine di misurare le pressioni plantari, si possono individuare due sistemi distinti:

- **SISTEMI DI MISURAZIONE ESTERNA ALLA CALZATURA**

  In particolare, i sistemi su pedana/piattaforma di forza, oppure la stereofotogrammetria, più utilizzata per diagnosticare eventuali difetti nella morfologia del piede, poiché comprende un sistema che adopera più telecamere e marker sul corpo dell'utente in questione, per ricostruire in modo accurato, (seppur con costi elevati), il moto di un punto lungo l'arco del movimento completo.

- **SISTEMI DI MISURAZIONE INTERNA ALLA CALZATURA**

  Ad esempio, i plantari inseriti dentro le calzature; si passa da tecnologie più semplici per correggere la postura podalica a quelle più complesse e articolate, come il caso dei plantari elettronici, che forniscono informazioni più complete per l'analisi del passo e delle pressioni plantari.

Nelle prossime pagine, si procederà quindi a presentare ed analizzare in modo più approfondito un tipo di struttura tecnologica per ciascuna categoria indicata.

2.1 Piattaforme di pressione

Quando il corpo umano entra in contatto col suolo, si generano delle forze, verticali o orizzontali, e dei momenti, la cui conoscenza è essenziale per rilevare le tensioni a cui vengono così sottoposti i muscoli, i legamenti e le articolazioni.

Le pressioni sono forze verticali per cui, al contrario delle strutture di forza che misurano tutte le componenti orizzontali e verticali, le piattaforme di pressione sono pedane volte

alla rilevazione della distribuzione di pressioni nel momento in cui il piede entra in contatto con il terreno.

L'utilizzo delle pedane è molto pratico poiché esse sono piane e statiche, ferme sul terreno. Non è possibile impiegarle in ambiente esterno al laboratorio e misurare quindi la distribuzione pressoria durante il movimento quotidiano dell'utente. Inoltre, il paziente deve appoggiare completamente il piede all'interno della pedana: un limite sta infatti nelle dimensioni non trascurabili e quindi nell'ingombro della pedana stessa. Un'ulteriore accortezza sta nel fatto che la presenza di una piattaforma su cui dover salire, può condizionare il modo in cui il peso viene ripartito, alterandone la rilevazione. A questo scopo, le pedane sono spesso nascoste nel terreno in modo da valutare ogni utente in una camminata che, dopo un breve periodo di assestamento, risulta pressoché spontanea. [18] [19] (Figura 2.1.1)

Figura 2.1.1. Piattaforma baropodometrica [17]

2.2 Strutture plantari e dispositivi inseribili nelle calzature

Per le ultime generazioni, sta prendendo sempre più spazio lo sviluppo e l'impiego di strutture per la rilevazione delle pressioni plantari tramite dispositivi inseribili direttamente all'interno della calzatura, a contatto diretto con il piede. Questa pratica è estremamente innovativa poiché concilia il basso costo con l'immediatezza d'uso, ottenendo un connubio vincente che spiega la fama che ne è derivata. Infatti, per l'utente sarà possibile avere quotidianamente informazioni sull'equilibrio o sull'energia spesa durante un esercizio e, in più, potrà anche verificare la coordinazione degli arti inferiori in fase di

esecuzione di una specifica attività. Le versioni più moderne sono anche dotate di una batteria ricaricabile e di un sistema di collegamento Bluetooth per la comoda e veloce trasmissione dei risultati. [18]

La disciplina che si occupa della distribuzione delle pressioni plantari è la *BAROMETRIA*; essa dà la possibilità di misurare le pressioni punto per punto del piede sul terreno, sia in fase statica, quando il soggetto si trova in posizione eretta, sia in fase dinamica, nel momento in cui il soggetto cammina o si muove.

Oggi, l'esame baropodometrico è diventato uno strumento essenziale in ortopedia e fisioterapia. Esso non solo aiuta a diagnosticare e monitorare patologie come l'ernia del disco, l'artrosi o i disordini della postura, ma è anche fondamentale nella prevenzione di problemi futuri, rendendolo un potente strumento per chi pratica sport, per gli anziani, e per chi vuole migliorare la propria qualità della vita. Ogni passo che facciamo, infatti, è influenzato dalla salute del nostro piede. Un corretto appoggio ha un impatto diretto sulla nostra postura, sull'efficienza del movimento e, in generale, sulla nostra salute fisica.

L'esame baropodometrico rappresenta il culmine di secoli di studi scientifici e innovazioni tecnologiche. Il suo sviluppo ha contribuito in modo determinante a migliorare la comprensione del nostro corpo, permettendo diagnosi più precise e trattamenti personalizzati. [21] (Figura 2.2.1)

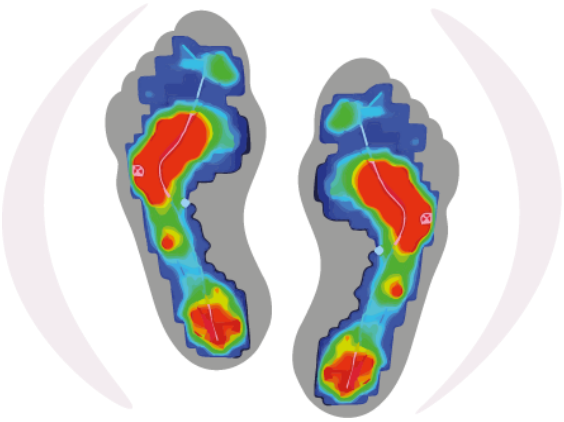


Figura 2.2.1. Possibile risultato di un esame barometrico [21]

2.2.1. Evoluzione dei plantari negli anni

Una soluzione interessante in termini di dispositivi elettronici, alla portata di tutti e di facile applicazione è, a partire dal 2008, quella proposta dalla prof.ssa Stacy Bamberg, dell'Università di Utah, che ha generato, in collaborazione con il suo 'team' di scienziati ed esperti in podologia, un sistema di '*Rapid Rehab'*. L'apparecchio consiste in un plantare in gel contenente al suo interno sensori di pressione e dispositivi IMU, con accelerometro e giroscopio. Tramite un sistema wireless, i dati registrati possono essere visibili da monitor e analizzati; l'utilizzo è rivolto a tutti coloro che hanno necessità di correggere la propria andatura fino ai casi più critici di pazienti con protesi o in riabilitazione dopo aver subìto un'amputazione. Il prezzo stimato per l'apparecchiatura completa è di circa 500$, decisamente economico se lo si confronta con gli strumenti presenti ed utilizzabili esclusivamente in laboratorio, molto più ingombranti e con costi sostenibili solo da aziende scientifiche finanziate. [22] [23] (Figura 2.2.1.1)

Figura 2.2.1.1. S. Bamberg progetta i plantari elettronici (2008) [24]

Questi dispositivi sono quindi in grado di rilevare l'orientamento del piede e l'istante in cui le dita si sollevano dal suolo.

L'evoluzione dei plantari è ulteriormente progredita con l'introduzione, intorno al 2010, da parte di Lin Shu, di un nuovo modello per la rilevazione della distribuzione pressoria nel piede. Essi, a differenza di quelli di Bamberg sviluppati principalmente in ambito di ricerca, mirano a rispettare le caratteristiche morfologiche del piede del paziente e possono addirittura essere personalizzati. Per realizzarli, si utilizza un array di sensori e una serie di materiali innovativi estremamente sensibili e in grado di rilevare le pressioni plantari richieste. Gli apparecchi si possono applicare direttamente sulla caviglia dell'utente e forniscono risultati visualizzabili tramite un'interfaccia grafica, sia a computer che su smartphone, presentando quindi una decisiva svolta in termini di praticità d'uso nella visualizzazione degli esiti. [25]

Al termine di questa presentazione, si è compresa la natura e lo scopo dei plantari e in generale di tutti i dispositivi volti all'analisi del passo e della distribuzione di pressioni del piede. Perciò, si è capito come tecnologia, ingegneria e studio anatomico/biomeccanico possono collaborare in modo efficiente per realizzare una struttura funzionale; infatti, il progetto non si limita ad uno studio fine a sé stesso, ma offre dei frutti tangibili e degli spunti importanti per affiancare il lavoro dei medici.

Possiamo dunque procedere nel prossimo capitolo con un'analisi macro e microstrutturale dal punto di vista elettronico delle componenti utilizzate per la loro realizzazione. Il percorso continua immaginando di entrare all'interno del plantare e studiarne l'impalcatura in sé.

CAPITOLO 3. *Architettura e sviluppo dei plantari*

I plantari sono composti da differenti componenti elettronici che garantiscono una corretta rilevazione delle informazioni e dei dati da utilizzare per l'analisi delle distribuzioni plantari. In questo capitolo, si illustreranno tutti gli elementi necessari per assemblare il meccanismo in modo pratico ed efficiente; si passerà poi a descrivere come queste componenti siano collegate per funzionare insieme al meglio.

3.1. Componenti elettronici per i plantari

Distinguiamo cinque componenti principali a cui se ne possono aggiungere altre per migliorare la prestazione complessiva del dispositivo [18] [27] (Figura 3.1.1):

- **MICROCONTROLLORE**

  La scheda *Arduino Nano*, compatta e versatile, è dotata di microcontrollore interno; offre la possibilità di connettersi a numerosi sensori.

- **SENSORI DI FORZA RESISTIVI**

  Rappresentano l'elemento di captazione per la rilevazione dei dati; sono in grado di misurare la forza applicata su un dispositivo.

- **CIRCUITO DI CONDIZIONAMENTO**

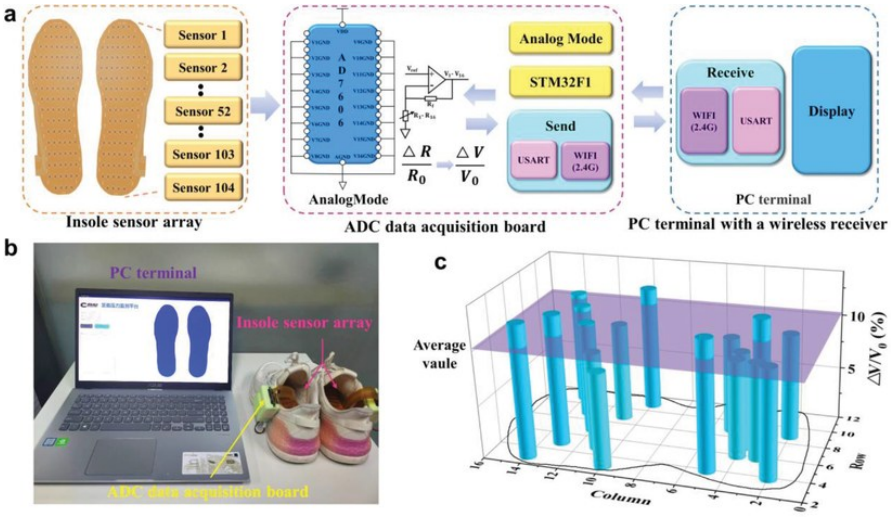
  Generalmente, è il circuito che prevede l'amplificazione, filtrazione ed elaborazione del segnale rilevato. Può quindi variare l'ampiezza del segnale in ingresso, rimuovere il rumore e le interferenze eventualmente registrate ma anche linearizzare l'andamento del segnale stesso. Nel caso dei plantari e dei sensori scelti, si opta principalmente per un *partitore resistivo* per preparare il segnale ai dispositivi successivi.

- **SISTEMA DI ALIMENTAZIONE**

  È rappresentato dalla *batteria portatile* associata al sistema, poiché il dispositivo è wireless, quindi funziona in assenza di cavi.

- **<u>SISTEMA PER LA VISUALIZZAZIONE DEI DATI</u>**

  È il sistema scelto per consentire la visualizzazione delle nozioni sensibili recuperate dai sensori; si utilizza ad esempio un *computer*, che funge da calcolatore e da monitor, in grado di processare i dati in ingresso e convertirli in informazioni utili per comprendere il funzionamento del piede.



<u>Figura 3.1.1</u>. Rappresentazione semplificata del funzionamento elettronico dei plantari [28]

<u>3.1.1. Microcontrollore</u>

Il microcontrollore è in grado di eseguire automaticamente un programma, come fosse un computer. È inoltre capace di dedicarsi a compiti specifici in modo più pratico e veloce. La scheda Nano appartiene alla famiglia delle 'Arduino' ed è un 'board' programmabile e dotata di un microcontrollore interno, che funge da fulcro interno della scheda stessa. Il linguaggio di programmazione deriva direttamente da C o C++ e risulta semplice nella stesura; il codice viene sviluppato in un IDE (Integrated Development Environment), un ambiente specifico per scrivere il codice, verificarlo, inserirlo tramite USB direttamente sulla scheda Arduino, ma anche monitorarne l'output. Si può inoltre implementare la

programmazione tramite librerie che aumentano le funzionalità e rispondono ad esigenze specifiche in fase di elaborazione del codice. [29] [30]

Rispetto ad una board classica, la versione Nano mantiene le medesime caratteristiche e modalità d'uso ma varia nelle dimensioni, nel peso e nei costi facendo risultare un ottimo rapporto qualità-prezzo. Infatti, la scheda ha dimensioni circa di (45 mm x 18 mm), pesa intorno ai 7 grammi e ha un costo variabile tra i 22 e i 27 euro. Il microcontrollore è l'ATmega328, a 8-bit AVR e prodotto da Atmel.

Le caratteristiche principali sono:

- **FREQUENZA DI CLOCK**: dai 16 ai 20 MHz
- **MEMORIA FLASH**: 32 KB
- **PIN I/O DIGITALI**: 14
- **PIN DI INGRESSO ANALOGICO**: 8
- **TENSIONE DI FUNZIONAMENTO**: 5 V
- **TENSIONE DI INGRESSO**: dai 5 ai 20 V
- **USB**: Mini-USB Tipo-B

Questa versione è stata sviluppata intorno al 2019 e prende il nome di "Nano R3"; nel 2025, è stata sviluppata la "Nano R4" in cui il microcontrollore utilizzato è differente e ha un connettore USB di tipo C. [30] (Figura 3.1.1.1)

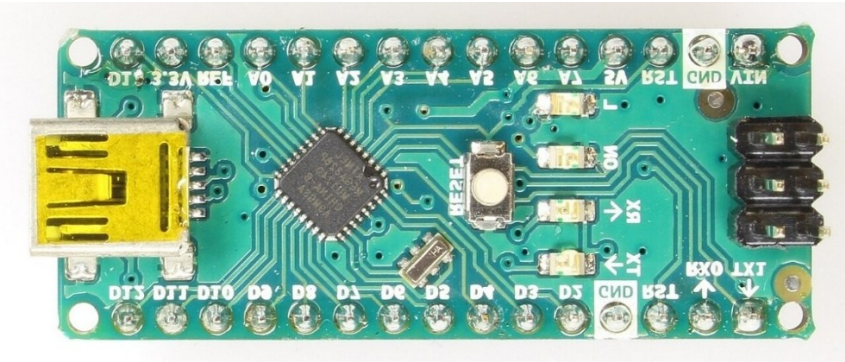


Figura 3.1.1.1. Rappresentazione di una scheda Arduino Nano [30]

3.1.2. Sensori di forza resistivi

I sensori resistivi contengono al loro interno dei sensori di forza resistivi (FSR, Force Sensitive Resistor), in grado di recepire una pressione e di trasformarla in una variazione di resistenza elettrica. La sensibilità dello strumento è variabile ma si aggira in un range che va dai 100g ai 10 kg. [18] (Figura 3.1.2.1)

Figura 3.1.2.1. Sensore di forza resistivo [31]

È formato da una pellicola polimerica (solitamente in PET, poliestere), che funge da supporto e ricopre due substrati principali, tra loro mantenuti separati da un ulteriore strato adesivo [18] [32]:

- **SUBSTRATO CONDUTTIVO**

  Costituito da un semiconduttore, con uno strato di inchiostro conduttivo al carbonio che modula la resistenza. Quest'ultima è direttamente collegata alla pressione applicata sul sensore da un rapporto di proporzionalità inversa: infatti, all'aumentare della pressione, diminuisce la resistenza complessiva. In assenza di una forza che viene applicata, vi sarà una resistenza pari a 1 MΩ. Il substrato conduttivo è in grado di modulare la corrente nel momento in cui entra in contatto con gli elettrodi presenti nel substrato superiore, chiudendo così il circuito.

- **SUBSTRATO CON ELETTRODI**

  È composto da una base di PET a cui si aggiungono degli elettrodi conduttivi stampati in argento o carbonio, in grado di trasmettere la corrente nel momento in cui viene premuto e quindi si applica su di esso una pressione. Per consentire il passaggio della corrente, vi sono due tracce, solitamente separate e disposte a pettine, che entrano in contatto portando in chiusura il circuito interno, che consente quindi lo scorrimento tra gli elettrodi stessi. Pertanto, questo substrato fornisce i terminali per applicare una tensione. [32] (Figura 3.1.2.2)

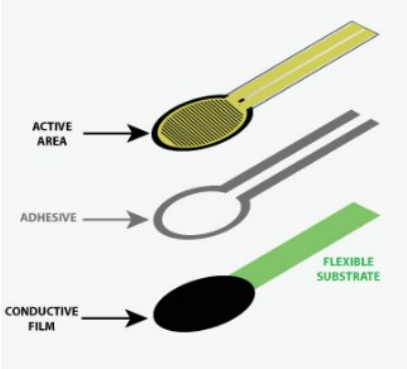


Figura 3.1.2.2. Illustrazione della stratificazione interna di un sensore resistivo [32]

Le dimensioni dei sensori sono importanti da considerare quando ci si interfaccia con una superficie ristretta come quella di un plantare. Tra queste troviamo:

- **LUNGHEZZA**: tra i 50 e i 60 mm
- **LARGHEZZA**: intorno ai 20 mm
- **DIAMETRO**: tra i 10 e i 15 mm
- **SPESSORE**: circa pari a 0,5 mm

Il costo si aggira tra i 4 e gli 8 euro e varia in base ai materiali di composizione e alla sensibilità di ciascun sensore.

3.1.3. Circuito di condizionamento

L'interfaccia con un sistema di interpretazione di dati non è semplice laddove i segnali in ingresso provengono dai sensori resistivi di forza, precedentemente descritti. Infatti, spesso gli impulsi rilevati da alcuni sensori risultano deboli, (e quindi dell'ordine dei millivolt) e necessitano di un'amplificazione che ne garantisca una traduzione più immediata; altre volte è necessaria una fase di filtraggio che elimini il disturbo o il rumore dato dalle interferenze elettriche che possono comunque venir comprese nella registrazione del segnale. Infine, il segnale può essere elaborato per linearizzarlo, centrarlo o convertirlo da analogico a digitale; la predisposizione è fondamentale prima di dare in pasto il segnale ad un sistema di sviluppo e progettazione in grado di ricavare da esso delle informazioni utili. Il ruolo del *circuito di condizionamento* consiste proprio nel rispondere a queste esigenze nel modo più completo possibile.

Nel caso specifico dei plantari, una soluzione conveniente per ottenere un ottimo circuito di condizionamento, è quella di utilizzare un *partitore di tensione* (o *partitore di voltaggio*) che possa fare in modo che i sensori resistivi contenuti all'interno dei plantari producano un segnale di tensione in uscita. A tal proposito, i sensori di forza non sono in grado di generare una tensione variabile, ma si limitano a garantire che la resistenza cambi nel momento in cui viene applicata una pressione. La presenza di un partitore di tensione, fa in modo che ad una compressione specifica corrisponda una tensione proporzionale alla sollecitazione applicata. A questo si aggiunge un ottimo rapporto qualità-prezzo visto che il partitore richiede esclusivamente la presenza di un sensore associato ad una resistenza fissa, ottimale nel caso di sistemi portatili e di piccole dimensioni, come i plantari. [33] [34]

Per costruire correttamente un partitore di tensione sono necessari:

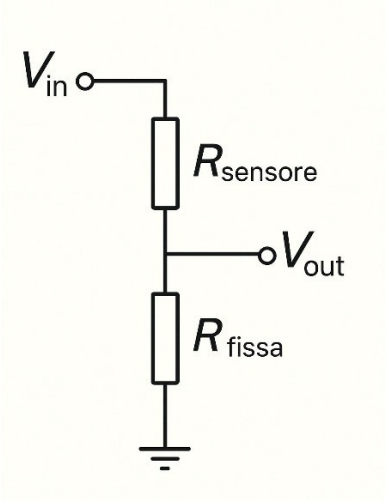
- **UNA RESISTENZA FISSA:** R_{fissa} associata a ciascun sensore;

- **UNA RESISTENZA VARIABILE**: R variabile data dal sensore stesso in base alla situazione e condizione d'utilizzo;

- **<u>UNA TENSIONE DI ALIMENTAZIONE</u>**: dai 3 ai 5 V;

- **<u>UN PUNTO IN CUI SI MISURI LA TENSIONE IN USCITA</u>**: V_{out} in uscita dal partitore, che possa variare in maniera significativa mentre la pressione concentrata sia massima o minima.

Il vantaggio di utilizzare dei sensori resistivi è quello di fare in modo che la loro resistenza possa oscillare in maniera tale da produrre un'ampia escursione di tensione nel partitore. Inoltre, per i sensori resistivi applicati ai plantari, la tensione in uscita è già nell'ordine dei volt; quindi, non necessita di un'operazione di amplificazione per rendere i dati più facilmente leggibili e manovrabili, al contrario dei sensori piezoelettrici o degli estensimetri che producono segnali dell'ordine dei millivolt. Tutto ciò fa in modo che non sia necessario l'inserimento all'interno del circuito di un amplificatore operazionale. Bisogna inoltre considerare che l'introduzione di un operazionale aumenta i costi di realizzazione e i consumi complessivi, per cui meno sono le componenti presenti nel circuito, più questo funzionerà impiegando minor energia. [34] (Figura 3.1.3.1)



<u>Figura 3.1.3.1</u>. Rappresentazione del partitore di tensione [33] [34]

Per il partitore di tensione, risulta quindi valido che:

$$Vout = Vin\left(\frac{Rsensore}{Rsensore + Rfissa}\right) = \frac{Vin}{1 + \frac{Rfissa}{Rsensore}}$$

Dove si possono evidenziare:

- **V_{OUT}**: Tensione d'uscita in funzione della pressione applicata
- **V_{IN}**: Tensione di ingresso, ovvero tensione di alimentazione
- **$R_{SENSORE}$**: Resistenza del sensore, che varia in base alla pressione applicata sul plantare
- **R_{FISSA}**: Resistenza fissa del partitore

3.1.4. Sistema di alimentazione

Il sistema elettronico interno ai plantari è wireless, quindi non presenta cavi di collegamento per far funzionare i circuiti; per questo motivo, risulta fondamentale la presenza di una fonte di alimentazione come una batteria portatile. La scelta della batteria è fortemente legata al tipo di circuito impiegato e ai consumi relativi a ciascuna delle componenti presenti. Una delle fonti principali di consumo energetico è l'Arduino Nano a cui si aggiunge il ***Modulo Bluetooth***, dispositivo che garantisce l'azione del meccanismo senza cavi, e i ***LED*****,** utilizzati per mostrare quando il dispositivo è acceso o per segnalare in modo specifico quando si raggiunge una determinata soglia di pressione.

Perciò, il valore di corrente complessivo assorbito dal circuito sarà pari a 80mV mentre l'Arduino Nano, come illustrato nel paragrafo 3.1.1, viene alimentato con una fonte che arriva ad un massimo di 20V partendo da un minimo di 5/6 V.

Un possibile sistema di alimentazione può quindi essere costituito da 4 batterie alcaline ricaricabili AA da 1,5 V ciascuna, per un totale di tensione pari a 6 V e una capacità di 3000 mAh. Il costo complessivo è quindi alquanto limitato e si aggira su una cifra inferiore ai 10 euro. Inoltre, per verificare e calcolare la durata complessiva delle batterie sarà sufficiente

eseguire il rapporto Q/I, in cui Q è la capacità delle batterie e I la corrente totale richiesta dal circuito, per vedere come 3000mAh/80mA, faccia risultare circa un giorno e mezzo di attività. [35]

3.1.5. Sistema per la visualizzazione dei dati

La garanzia di un riscontro pratico ed immediato dei dati ottenuti tramite il sistema di rilevazione, correttamente alimentato e monitorato dal circuito di condizionamento, è possibile grazie ad un sistema per visualizzare i dati. A questo fine, il più comune ed utilizzato è il computer, che funge da calcolatore per ottimizzare i dati in modo accessibile all'utente che si approccia all'uso dei plantari; il monitor è però essenziale per offrire al consumatore un'interfaccia semplice ed intuitiva, per relazionarsi al meglio con valori numerici complessi.

Lo sviluppo sempre più forte di questi sistemi, affiancato all'importante necessità di offrire un prodotto sempre più facile da utilizzare, permette oggi di accedere ai risultati registrati anche tramite uno smartphone, interagendo direttamente con le dita sullo schermo, senza una tastiera per connettersi al dispositivo.

L'interfaccia grafica può essere resa sempre più interattiva e funzionale grazie all'importante lavoro dei tecnici informatici, che sviluppano ed elaborano le applicazioni per l'utente, ultimo step della catena di interconnessione tra l'uomo e la macchina. Infatti, è proprio grazie alle comode 'app' che ci si può relazionare alle apparecchiature e confrontare i valori registrati con quelli standard di riferimento, per completare una valutazione accurata sulla condizione morfologica del piede. [37] (Figura 3.1.5.1)

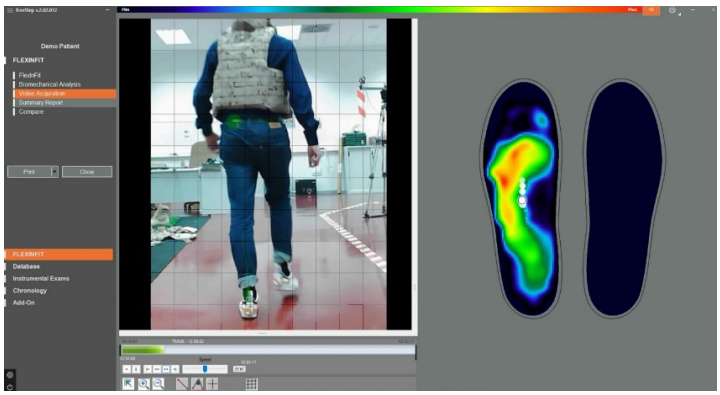


Figura 3.1.5.1. Interfaccia grafica delle pressioni plantari, visibile da computer [37]

3.2. Come si realizza il sistema

Dopo aver valutato le componenti elettroniche, è necessario comprendere dove posizionare i sensori, in modo che entrino in contatto con le zone del piede che diano valori significativi di pressione registrata. Possiamo posizionare quindi tre/quattro sensori nella zona del tallone e tre nella zona dell'avampiede a cui se ne aggiunge un quarto sotto l'alluce: la presenza di più sensori, riesce a segnalare in modo rapido ed efficiente la presenza di difetti nella postura podalica. [38] (Figura 3.2.1)

Possiamo distinguere le tre situazioni principali in termini di postura del piede e notare come i sensori siano in grado di mettere in evidenza nel modo corretto:

- **APPOGGIO NEUTRO**

  In questo caso, tutti i sensori in linea (sia anteriore che posteriore) rilevano una pressione simile; ciò significa che il peso è equamente distribuito in fase di appoggio e di impulso nella rullata del piede, senza sottoporre alcuna zona del piede a carichi eccessivi e maldistribuiti.

- **APPOGGIO SUPINATORE**

  Se l'appoggio è supinatore (piede tipicamente "cavo"), la pressione maggiore, e quindi il peso, si registra nei sensori esterni prossimi al taglio del piede, poiché è quella la zona che riceve più stimolazione e di conseguenza più carico. In questa situazione l'eventuale sensore sull'alluce verrà poco stimolato.

- **APPOGGIO PRONATORE**

  L'appoggio pronatore (piede tipicamente "piatto") comporta invece la concentrazione della pressione sulla zona interna del piede, sollecitando maggiormente i sensori interni di entrambe le linee, anteriore e posteriore; il paziente tende solitamente ad impiegare una porzione di pianta superiore nel passaggio tra appoggio sul tallone a quello sull'avampiede nella deambulazione.

Inoltre, se è presente un sensore nella zona dell'alluce, questo verrà particolarmente stimolato da un appoggio pronatore.

A questo gruppo di sensori, può seguire l'inserimento di uno o due sensori nella zona dell'arco del piede, che possano contribuire a rilevare un'eventuale camminata supina.

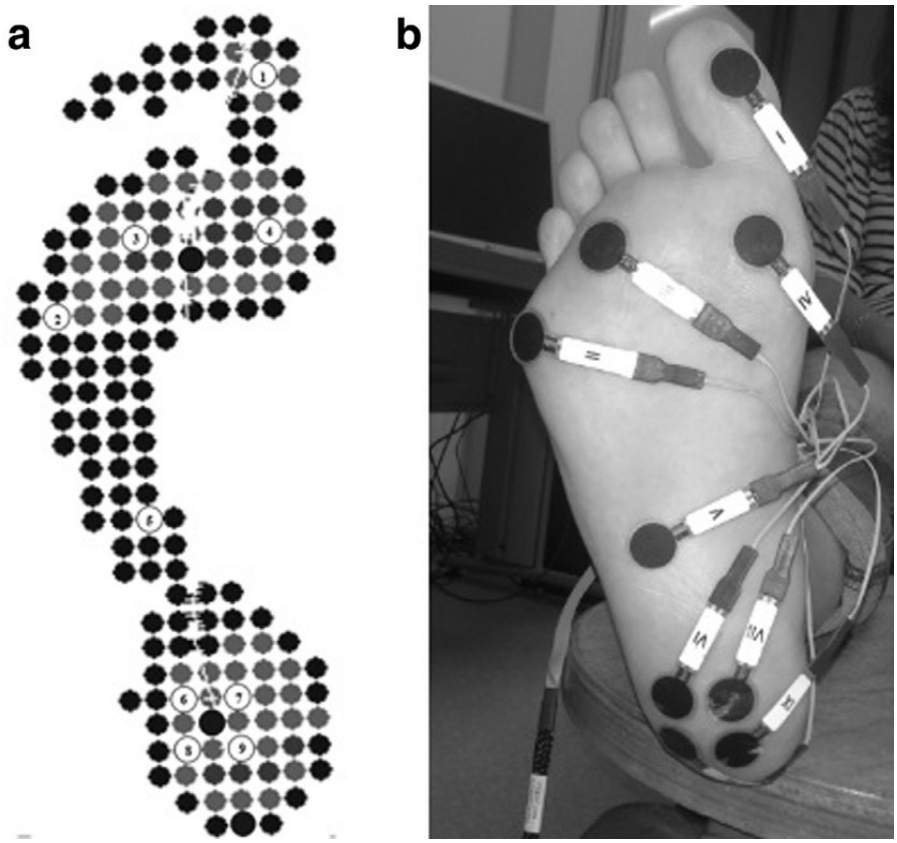


Figura 3.2.1. Distribuzione dei sensori sulla pianta del piede [38]

3.2.1. Hardware

Nel caso dei plantari elettronici, i sensori sono direttamente integrati sul dispositivo e posizionati in modo da garantirne il contatto con le zone del piede sopra citate. La presenza di sensori integrati nelle calzature richiede l'utilizzo di cavi che fuoriescono dalla scarpa, collegati direttamente con un dispositivo posto sulla caviglia del paziente, tramite un supporto che ne mantenga la posizione nel corso dell'attività e della rilevazione. Questo garantisce un contatto e uno scambio diretto di dati tra i plantari elettronici e i dispositivi volti alla registrazione dei dati. [39] [40] (Figura 3.2.1.1)

Figura 3.2.1.1. Rappresentazione dei plantari e dei dispositivi da legare alla caviglia del paziente [39]

3.2.2. Software

Per visualizzare i risultati ottenuti, sarà importante utilizzare uno strumento di interfaccia con cui l'utente possa interagire in modo intelligente e intuitivo. Si possono programmare sistemi con differenti linguaggi (ad esempio Java o Python) tramite una piattaforma. Tutti i dispositivi della parte hardware sono connessi tramite Bluetooth al computer, a cui vengono trasmesse tutte le informazioni registrate in fase di acquisizione. In questo modo, indipendentemente dal grado di competenza informatica del paziente in questione, sarà possibile visualizzare i risultati sullo schermo; i dati vengono elaborati e preparati in modo tale da arrivare al paziente nella maniera più diretta possibile. Il software è in grado, inoltre, di registrare ogni paziente tramite una scheda che possa contenere tutte le informazioni di

ognuno, così da tracciare uno storico preciso dell'utente che approfondisca la condizione, specialmente se si rientra da un infortunio o se il paziente è soggetto a specifiche patologie che possano comprometterne la prestazione. Nel caso di atleti che si approccino all'utilizzo dei dispositivi, i dati così registrati possono essere resi disponibili ai preparatori atletici che si occupano di apprendere come migliorare la performance sportiva. Le osservazioni biomeccaniche riscontrate possono avere grande efficacia nell'acquisire quali distretti muscolari siano maggiormente coinvolti durante l'attività: questo può portare a concentrare l'allenamento sullo sviluppo delle aree muscolari più difficilmente coinvolte da un'attività regolare, così da garantire una crescita del muscolo a tutto tondo, per una resa più performante. [37] [41] (Figura 3.2.2.1)

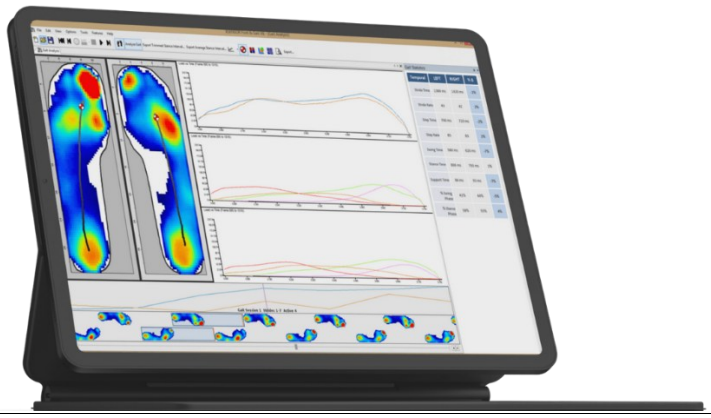


Figura 3.2.2.1. Interfaccia per monitorare l'analisi del passo [41]

Terminata questa sezione, si è appreso fino in fondo quali siano gli elementi fondamentali per costruire un modello di plantare elettronico funzionante e contenente le componenti essenziali che assicurino una corretta analisi del passo. Bisogna però tenere conto che, quando si progetta un'apparecchiatura articolata e complessa, serve sempre valutare quali sono i costi complessivi per la realizzazione del progetto, in modo da avere il budget necessario alla costruzione del dispositivo. Nel prossimo capitolo, si analizzerà in breve il costo medio dei plantari elettronici, immaginando di essere un'azienda che vuole approcciarsi a formare una nuova struttura.

CAPITOLO 4. *Il costo dell'innovazione: l'impatto economico dei plantari elettronici*

Dopo aver compreso e studiato la natura e il funzionamento dei nuovi plantari elettronici, si può ora immaginare di essere un'azienda che vuole investire nella realizzazione di questa tecnologia. Quali sono le spese effettive di fronte a cui ci si troverebbe? In questo capitolo, si andrà quindi a completare una breve ma esaustiva analisi economica dei costi da dover sostenere per poter assettare in maniera adeguata (vedi Capitolo 3) la macro e microstruttura elettronica, oltre ai materiali di rivestimento, che dovranno essere adatti ad entrare in contatto con la pelle, ma allo stesso tempo dovranno garantire la protezione dei componenti senza danni che ne compromettano le funzionalità. Un secondo fattore che non va assolutamente trascurato, è rappresentato dal costo della squadra di ingegneri e tecnici che dovranno dedicarsi al progetto e all'assemblaggio del sistema. Si dovranno infine aggiungere i costi per la sperimentazione e la pubblicizzazione del prodotto per avvicinare gli utenti al consumo.

4.1 Analisi dei costi

Nel momento in cui ci si approccia alla realizzazione pratica di un prodotto, serve valutare quali siano le spese necessarie da affrontare e capire se si è in grado di sostenerle, una volta avviato il progetto. Con il termine '*costi di produzione*', si includono tutte le uscite associabili direttamente o indirettamente alla concretizzazione del prodotto. [42] [43] [44]

Per questo distinguiamo due categorie principali che saranno presentate nelle prossime pagine.

4.1.1 Oneri produttivi indiretti

Rappresentano una piccola percentuale dei costi complessivi (tra il 5 e il 10%) e fanno riferimento alle attività intorno alla produzione stessa, e non alla singola creazione dell'oggetto in sé [44]. Possono essere:

- ✓ ***FISSI***: come i costi dell'energia elettrica, della rete per telefoni e navigazione su Internet e delle assicurazioni; questi risultano elementi essenziali nel corso di un processo lavorativo che può richiedere dei mesi prima di arrivare al suo adempimento finale.

- ✓ ***VARIABILI***: per verificare che il prodotto abbia un corretto funzionamento, occorre testarlo in più situazioni e sperimentarne le capacità effettive una volta realizzato; serve quindi eseguire un controllo qualità prima di arrivare alla commercializzazione. Inoltre, bisogna considerare le quote per la manutenzione e le eventuali modifiche poiché l'articolo definitivo potrebbe non assecondare subito le aspettative del progettista.

4.1.2. Oneri produttivi diretti

La parte sostanziale del budget a disposizione va invece indirizzato verso il completamento definitivo del plantare. Oltre all'allestimento della componentistica elettronica principale nel modo migliore per formare un circuito ad hoc, bisogna tenere conto degli stipendi di coloro che se ne occupano e impiegano il loro tempo per far giungere il progetto al suo stadio terminale. [43]

Si possono quindi distinguere:

- ✓ ***COSTI PER LA MANODOPERA***

  Riguardano l'uscita di denaro da destinare al personale di esperti in materia (in questo caso podologici e specialisti del piede e delle sue caratteristiche), tecnici, ingegneri che lavorano per consentire la progressione e lo sviluppo del progetto. Il totale è variabile a seconda del numero di addetti che si decide di inserire per portare

a termine la realizzazione del plantare; tenendo conto che lo stipendio medio per ognuna delle figure citate è tra i 2000 e i 2500 euro, l'importo va moltiplicato per la squadra di tecnici selezionata.

- ✓ ***COSTI PER I MATERIALI***

  Si considera l'insieme di tutte le componenti elettroniche e i rispettivi collegamenti essenziali per completare in modo adeguato il circuito alla base del funzionamento del plantare o della piattaforma. La struttura interna va inoltre rivestita adeguatamente con materiali come gel o tessuti, in grado di mantenere un contatto con la pelle che non irriti la cute ma allo stesso tempo capace di creare un impianto esterno adatto al sostegno della figura. Per questo motivo, ogni singolo prodotto realizzato richiede un progetto specifico e una ricerca di materiali attenta e minuziosa. Il risultato è quello di un articolo stratificato: la scelta di materiali esterni è infatti volta anche alla protezione del circuito interno che potrebbe essere danneggiato dal peso sovrastante e dagli sforzi in fase di movimento. Il costo complessivo stimato per un singolo plantare è quindi di circa 50-60 euro, tenendo conto di tutta l'attrezzatura necessaria. [43] [45]

Nella tabella sottostante (Tabella 4.1), è riportato l'insieme di tutti gli elementi indispensabili alla realizzazione dell'articolo, suddivisi per ciascuna delle sezioni indicate considerando il loro prezzo medio. Questo permette di stimare un prezzo complessivo per ciascun oggetto creato. È opportuno però tenere in considerazione che i costi di produzione possono cambiare a seconda del numero di pezzi prodotti: infatti, più è alta la richiesta, minori saranno le richieste economiche poiché si distribuiscono su un numero più grande di articoli le tasse di attuazione.

PRODOTTO	QUANTITÀ	COSTO (complessivo)
Arduino Nano	1	25€
Sensori	6-7	40€ (circa 6-7€ l'uno)
Modulo Bluetooth	1	Tra i 3 e i 5€
Led	1	1€ (circa)
Materiali per il rivestimento esterno	-	Tra 1 e 2€
Altre spese (cavi, resistenze...)	-	10€ (circa)
TOTALE		**80€**

Tabella 4.1

Dopo aver analizzato e stimato a grandi linee quali sono le spese per un'azienda che vuole investire sulla produzione di plantari elettronici, si può passare, nel prossimo capitolo, a mostrare alcuni esempi pratici di prodotti simili a quelli descritti fino ad ora. Ciò consente di capire che cosa è già presente sul mercato, come può essere migliorato e quali possono essere i nuovi orizzonti per l'uso dei plantari, se si vuole offrire un articolo non ancora in vendita.

CAPITOLO 5. *Applicazioni pratiche e prospettive di sviluppo futuro*

Nei capitoli precedenti, sono state analizzate tutte le peculiarità fondamentali per comprendere a fondo il funzionamento dei plantari elettronici e delle strutture quali pedane di forza per la rilevazione delle pressioni plantari. Dunque, serve ora avere un riscontro visivo su quali siano i modelli già presenti sul commercio e quali siano le caratteristiche principali per gli utenti che decidono di utilizzarli. In seguito, verranno studiati i possibili orizzonti per lo sviluppo di tali apparecchiature per renderle più performanti e adatte all'utilizzo in ambito sportivo.

5.1. Prodotti SENSOR MEDICA

'Sensor Medica' è un'azienda italiana con varie sedi, tra cui quella principale a Roma, che opera dal 2011 ed è specializzata in diversi settori, tra cui quello di baropodometria e biomeccanica del piede. Si occupa della commercializzazione di più prodotti in questi ambiti, tra cui i plantari elettronici FlexInFit e le pedane baropodometriche FreeMed.

Ci si concentrerà quindi sulla descrizione e l'analisi di questi prodotti.

5.1.1. Plantari FlexInFit

'FlexInFit' rappresenta l'evoluzione nel campo dell'analisi biomeccanica e posturale. Ogni paio di plantari sensorizzati è composto da più di quattrocento sensori di pressione e consente un'analisi accurata all'interno della scarpa del paziente, il monitoraggio in tempo reale dell'avanzamento dell'esame e la registrazione dei dati fino a quattro ore. [37]

Consiste in una soletta leggera e pratica da utilizzare, facilmente indossabile e inseribile all'interno della calzatura mantenendo una camminata comoda e non condizionata dalla presenza di un dispositivo di rilevazione dati. Il dispositivo 'FlexInFit' si posiziona nella zona della caviglia (Figura 5.1.1) ed è in grado di registrare le informazioni colte dagli oltre duecento sensori. È uno strumento molto utile poiché rappresenta un ottimo alleato per

affiancare il lavoro di medici e fisioterapisti nella comprensione della postura del piede in fase di deambulazione; riesce quindi a supportare la creazione di plantari ortopedici di utilizzo quotidiano in modo personalizzato per ciascun paziente che ne ha bisogno. Si connette in modo semplice tramite Bluetooth; le indicazioni ottenute sono facilmente visualizzabili da computer o tablet.

Figura 5.1.1. Plantari sensorizzati FlexInFit da inserire all'interno delle calzature con apparecchio di acquisizione dati sulla caviglia [37]

5.1.2. Pedane FreeMed

'FreeMed' è una linea di sistemi di supporto del piede e di valutazione della postura che consentono l'analisi statica, dinamica, stabilometrica e videografica del paziente. Le pedane baropodometriche sono composte da Lega di alluminio, che le rendono leggere e portatili. Ogni piattaforma ha centinaia di sensori di pressione rivestiti in oro 24 carati, consentendo al sistema di scansionare un'immagine ad alta risoluzione. Grazie all'alta qualità dei sensori, FreeMed può acquisire oltre 400 fotogrammi al secondo, cosa fondamentale per ottenere un'analisi dettagliata della linea del passo e delle oscillazioni del baricentro corporeo. [46]

Le piattaforme sono ultrasottili (Figura 5.1.2) e sono in grado di garantire grande affidabilità nel tradurre in dati numerosi segnali analogici, tutto questo in tempo reale, così da

permettere uno studio del piede e dell'andatura corretto. Possono essere affiancate dal software 'FreeStep' per la misura di parametri spazio-temporali come la distribuzione del carico, le superfici di appoggio, l'andatura ma anche gli assi e gli angoli podalici.

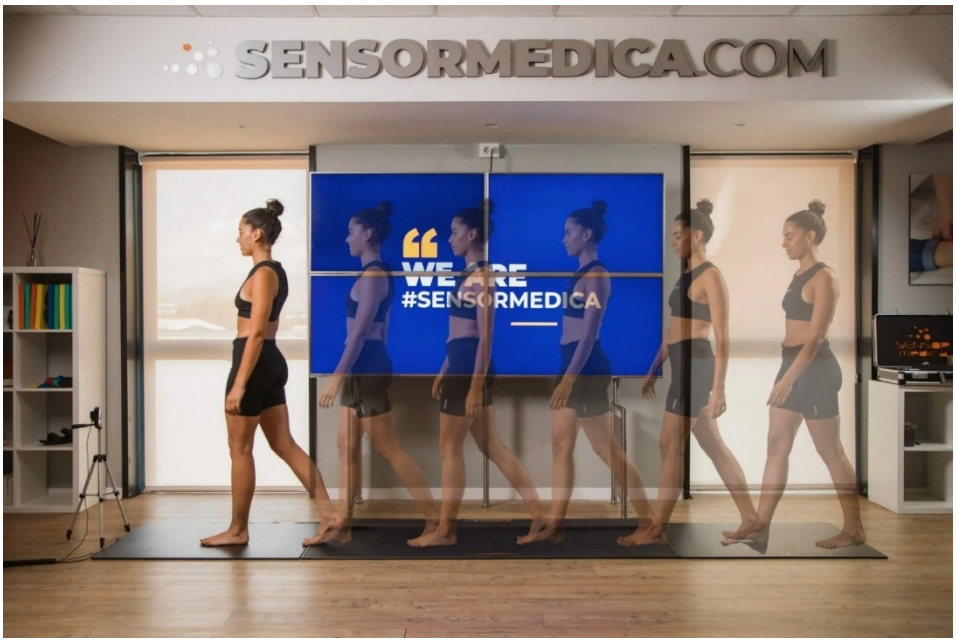


Figura 5.1.2. Pedane baropodometriche FreeMed per l'analisi del passo e dell'andatura del paziente [46]

5.2. Plantari Pedelab Active

I 'Pedelab Active' sono plantari amplicettori specifici per lo sport; l'azienda che li realizza è 'Orthobit' e ha sede a Milano. È in grado di realizzarne di differenti tipologie in base alla disciplina d'interesse praticata tra cui calcio, pallavolo e più specialità dell'atletica.

Questi plantari possono contribuire a ridurre il carico e lo stress su articolazioni, muscoli e legamenti, prevenendo o alleviando dolori. Ristabilendo un appoggio corretto del piede, aiutano a ripristinare l'equilibrio del corpo nel suo complesso, consentendo una distribuzione uniforme delle forze e una corretta biomeccanica durante il movimento. [47]

Essendo dispositivi di supporto indirizzati principalmente all'attività fisica e sportiva, si rivolgono a tutti gli atleti che vogliono massimizzare e migliorare la prestazione agonistica, ma anche prevenire eventuali infortuni. Nel caso dell'atletica, i plantari sono volti a prevenire problematiche ai talloni, ma anche alleviare l'eventuale dolore senza aggravare

la situazione. Per i calciatori, sono invece specializzati per i cambi di direzioni rapidi e repentini senza compromettere la salute del piede. Per tutti gli sport di squadra indoor, come la pallavolo e il basket, che richiedono una sollecitazione intensa e continue, serve proteggere le zone vulnerabili del piede garantendo maggior comfort nel corso degli allenamenti o dell'attività in campo (Figure 5.2); una volta indossata, la soletta non deve dare sentirsi né dare fastidio. Anche per i ciclisti, è possibile utilizzare delle strutture specializzate per distribuire in modo adeguato la forza su tutta la pianta del piede in modo da trasmettere più facilmente la forza sui pedali e non sovraccaricare troppo i piedi.

La realizzazione di tali plantari avviene grazie a test iniziali offerti direttamente dall'azienda al momento dell'acquisto del dispositivo. Questo consente di rilevare e comprendere in modo più approfondito qual è la scelta migliore per il proprio piede.

Figura 5.2. Plantari Pedelab Active Ball specifici per gli sport indoor quali la pallavolo e il basket nella massimizzazione della prestazione atletica [47]

5.3. X4 Intelligent Insole System

'XSensor' è un marchio per plantari e apparecchiature per la rilevazione della pressione plantare che ha sede in Canada; i plantari 'X4 Intelligent Insole System' contengono all'interno oltre duecento sensori e sono ottimi sia per l'acquisizione di dati con estrema precisione, sia per una valutazione dell'andatura e delle pressioni plantari esercitate

(Figura 5.3.1). La peculiarità principale risiede nel fatto che i dispositivi non richiedono di essere utilizzati in laboratorio, ma possono essere applicati durante l'attività sportiva senza perdere accuratezza nel fornire le risposte desiderate.

Sensori ad alta precisione e ripetibilità, con un errore di fondo scala pari a ±5% e una risposta rapida, garantiscono l'acquisizione di dati ad alta risoluzione. La presenza di fino a 235 sensori per piede consente una rilevazione dettagliata, ideale per ottenere dati e affidabili nell'analisi dell'andatura e della pressione plantare. La raccolta dati ad alta velocità, fino a 150 Hz, combinata con una lunga durata della batteria e memoria interna, permette un'acquisizione continua e completamente autonoma. Le immagini possono comodamente essere proiettate e visionate da monitor mantenendo un'elevatissima qualità. [48]

Le pedane XSensor sono di differenti tipologie tra cui 'Walkway Sensor', adatta alla misurazione della distribuzione del carico durante il passo. Il design è pratico e compatto ma è specifico per l'utilizzo in laboratorio o in clinica nella misurazione dell'andatura. Le informazioni procurate possono essere visionate dallo schermo di un PC e mostrano in maniera semplice le zone di maggior pressione nel corso della camminata, distinguendo ciascun passo. (Figura 5.3.2)

Figura 5.3.1. Dispositivi 'X4 Intelligent Insole System' per la rilevazione dati in fase di corsa [48]

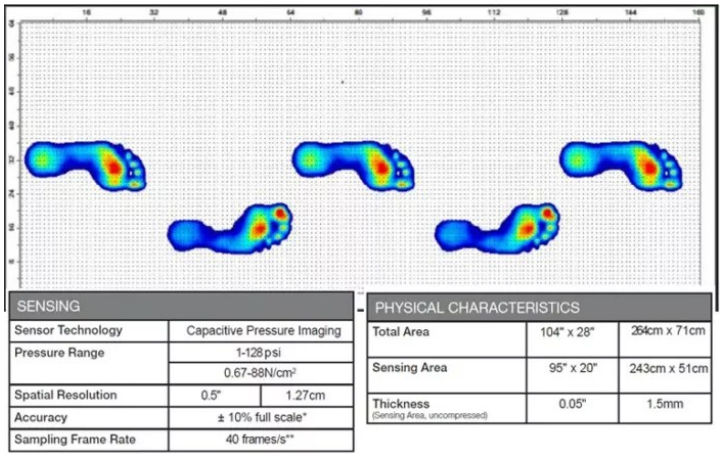


Figura 5.3.2. Risultato visualizzato su monitor dell'analisi del passo con pedane 'Walkway Sensor' [48]

5.4. Salted Smart Insoles

Le solette intelligenti 'Salted' sono dispositivi indossabili quotidianamente basati sull'ioT, cioè in grado di migliorare le proprie prestazioni e funzionalità grazie all'uso dei sensori di cui sono dotati, collegati a loro volta a Internet e in grado di reperire informazioni e di inviare dati.

Grazie a questa tecnologia brevettata possono misurare con accuratezza la distribuzione del carico, l'eventuale squilibrio del peso corporeo e il movimento muscolare dell'atleta che li inserisce nella calzatura. Sono formati da più strati di materiale e contengono al loro interno quattro sensori di acquisizione pressoria direttamente connessi con un microprocessore che possa inviare dati. Tramite l'associazione Bluetooth la soletta è connessa continuamente e può continuare a trasmettere i dati registrati dai sensori interni.

Le Salted sono regolabili nella forma in modo da adattarsi alla misura del piede come delle classiche solette da inserire nelle scarpe. Hanno la peculiarità di essere impermeabili e quindi resistenti all'acqua e alla polvere, consentendone l'utilizzo anche in giornate piovose o nevose ma anche il lavaggio a mano dopo una giornata di allenamento. Sono leggere e sottili in modo da risultare comodo nella calzata durante l'attività e la prestazione atletico-sportiva. (Figura 5.4)

Tale apparecchiatura risulta ottima per controllare e monitorare l'equilibrio del corpo a livello quotidiano, aiutando a correggere e sistemare anche la forma dell'arcata plantare per prevenire o curare infiammazioni articolari dovute al sovraccarico. [49]

Sono acquistabili anche su Amazon e sono particolarmente utilizzate da chi pratica il golf poiché, oltre a comprendere come si distribuisce il carico sulla superficie della pianta, sono ottime nel rilevare come il peso si distribuisce in fase di caricamento per lo swing; ciò fornisce informazioni utili per migliorare e ottimizzare il movimento in modo da concentrare la forza sulla pallina e arrivare in modo coordinato e al massimo della forza all'impatto.

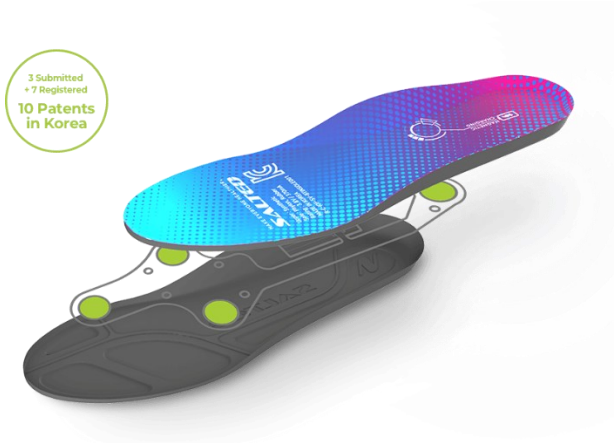


Figura 5.4. Stratificazione delle solette intelligenti Salted [50]

5.5. Prospettive per lo sviluppo futuro

L'utilizzo degli innovativi plantari elettronici è alquanto diffuso ma come tutti i prodotti che hanno alle spalle un importante struttura tecnologica, bisogna tenere conto delle possibili variazioni e innovazioni a cui essi possono andare incontro. La presenza di un certo numero di pezzi elettronici all'interno dell'apparecchio, fanno sì che il costo complessivo del singolo oggetto si aggiri in media tra i 200 e i 500 euro. Lo sviluppo tecnologico pone di fronte ad un bivio: da una parte, è necessario rendere i plantari ancor più performanti, tramite sensori completi nel fornire in modo approfondito le dinamiche dello spostamento;

dall'altra, l'utilizzo di una maggior attrezzatura porta ad un ulteriore incremento del prezzo complessivo. Inoltre, l'ulteriore margine sta nell'applicazione di materiali più leggeri, adatti alla prestazione sportiva e in grado di migliorarla o massimizzarla; i materiali devono inoltre mantenere un certo standard di eco-sostenibilità e biodegradabilità nella loro fabbricazione. Bisogna quindi trovare un equilibrio e un compromesso adeguato tra innovazione, sviluppo e accessibilità per il cliente che decide di utilizzarli. Infatti, più la tecnologia è sofisticata, e più l'acquisto del prodotto diventa esclusivo per le aziende e gli studi medici che possano offrire un supporto ai pazienti tramite visite e servizi a pagamento. [51]

In termini di prestazione atletica, il passo principale nell'evoluzione e lo sviluppo delle solette smart, richiede sensori con rilevazione multiasse, capaci di catturare non solo le pressioni verticali ma anche le *shear forces,* cioè le forze di scorrimento orizzontale; ciò comporta maggiore fedeltà nel monitoraggio dinamico del piede. L'ulteriore componente che ha peso nell'ottimizzazione della performance risiede nella tempestività con cui si eseguono le acquisizioni, in modo da rilevare in modo immediato l'appoggio e correggere la postura in tempo reale. Al fine di offrire maggiore comfort ed esplosività nella prestazione atletica personalizzata su misura per ogni utente, si possono applicare dei sensori in schiuma soft stampati in 3D. L'obiettivo principale dei plantari per essere competitivi e facilmente acquistabili sul mercato, rimane quello di garantire comodità ma soprattutto offrire un miglioramento tangibile nella propria postura e di conseguenza nel modo di giocare o competere quando si è in azione, senza spostare eccessivamente l'attenzione sul singolo movimento, poiché questo lo renderebbe meccanico e poco disinvolto.

CONCLUSIONI

In questo lavoro, son state analizzate le caratteristiche fondamentali di tutte le strutture disponibili oggi in commercio, per constatare la pressione esercitata dai piedi sulle superfici d'appoggio con cui entrano in contatto in fase statica, quando il soggetto è in piedi, e in fase dinamica, quando invece corre o cammina.

Tale pratica prende il nome di *baropodometria* e permette di apprendere le informazioni essenziali per comprendere come il peso si distribuisce fino al suolo. In particolare, l'attenzione è posta su coloro che praticano un'attività sportiva e necessitano di un supporto che consenta di prevenire o curare le eventuali infiammazioni alle articolazioni di caviglie e ginocchia fino a raggiungere le anche. Infatti, si è appreso che i piedi sono solo il terminale della catena cinematica costituita dal corpo umano e il modo con cui si relazionano al terreno è di fondamentale importanza. Inoltre, conoscere quali sono le pressioni plantari rende possibile riflettere su quali siano i punti di appoggio principali nel momento in cui si svolge l'attività fisica, quindi in fase di corsa o di salto. Per massimizzare la prestazione atletico-sportiva è importante svolgere prima degli esami che possano acquisire le informazioni necessarie a livello posturale, specialmente in fase dinamica; in seguito, i test permettono di realizzare delle solette specifiche da usare quotidianamente, non per forza 'smart' ma che supportino l'utente ogni volta che appoggia i piedi per terra.

L'analisi eseguita non è rivolta solo agli atleti, ma anche a chi sceglie di eseguire esami specifici tramite una tecnologia avanzata, come quella dei plantari elettronici per correggere ed essere accompagnati nelle attività che vengono svolte quotidianamente. Questo testo ha quindi la volontà di promuovere e diffondere la conoscenza di tali dispositivi in modo che più persone possibili scelgano di avvicinarsi, o almeno provare per una volta, l'esperienza di ricevere un supporto personalizzato.

Al momento ci sono diverse aziende e marchi che se ne occupano, ma più l'utilizzo diventa comune, più si allarga il mercato dei plantari elettronici e la scelta per i futuri clienti in fase d'acquisto. La consapevolezza è il primo passo verso la performance.

RINGRAZIAMENTI

Giunta al termine di questa tesi, vorrei ringraziare il professor Gaudenzio Meneghesso per la piena disponibilità, il supporto e per avermi guidato lungo tutto il percorso di completamento dell'elaborato finale.

Ci tengo molto a ringraziare anche i miei genitori e i miei sostenitori più stretti per avermi seguito e appoggiato nell'arco di questi tre anni, senza mai dubitare della mia costanza e della mia determinazione nel portare a termine gli impegni presi.

Vorrei essere l'esempio, per tutti gli studenti e le studentesse atlete, per dimostrare che con la convinzione e la mentalità giusta, si possono conciliare sport ad alto livello e studio universitario anche nelle facoltà più difficili, nonostante spesso ci venga detto che è impossibile farlo.

BIBLIOGRAFIA:

[1] Green, J.H., "Introduzione all'anatomia umana", Zanichelli, Bologna, 1983

[2] https://browzine.com/libraries/3631/journals/4066/issues/current

[3] Paparella Treccia R., “Il piede dell'uomo”, Verduci Editore, 1978

[4] Netter, “Atlante di anatomia”, EDRA

[5] The Diabetic Foot, capitolo curato da Dennis Shavelson, John Steinberg e Bradley W. Bakotic, 2017

[6] https://www.formativezone.it/anatomia-del-piede/?srsltid=AfmBOopFMjZiFc38K4xZQGVRgbSRXd8MtVaJ1txDU2Qj0DV2UrVypAhq

[7] NCBI Bookshelf – StatPearls, Anatomy, Bony Pelvis and Lower Limb: Arches of the Foot, 2022

[8] https://www.raffaelloriccio-foot-surgery.com/come-liberarsi-dai-dolori-del-piede-piatto-con-la-proloterapia/

[9] https://www.webconsultas.com/ejercicio-y-deporte/medicina-deportiva/tipos-de-pisada

[10] https://www.doctorpetrone.com/about-us/services---techniques/sciatica-.html

[11] A State-of-the-Art Review of Foot Pressure, capitolo curato da Siti Syazni Zulkifli e Wei Ping Loh, 2018

[12] https://www.romacammina.it/insieme-a-distanza-usiamo-bene-i-piedi/

[13] https://universalkinesiology.it/biomeccanica-analisi-del-cammino-e-della-corsa/

[14] https://www.santuccirunning.it/la-corsa-struttura-del-movimento-generale-115211/?srsltid=AfmBOoqAG9IwQSkbua6XJ_46YF80JDCOk7apoFHFFHFlb76Apk8oFal_

[15] A Simple Test to Determine Your Foot Type, capitolo curato da Ruggero Loda, Running Shoes Guru, 2019

[16] https://www.riccardocastellini.com/post/come-appoggiare-il-piede-durante-la-corsa

[17] https://ortopedia-viciguerra.it/il-piede-dello-sportivo/

[18] G. AVANZOLINI, E. MAGOSSO, Strumentazione biomedica. Progetto ed impiego dei sistemi di misura. Patron Editore, Bologna, 2015

[19] Plantar pressure measurement Clinical Gait Analysis, 2006, Pages 97-115 Chris Kirtley MD PhD

[20] Structural and functional predictors of regional peak pressures under the foot during walking Journal of Biomechanics, Volume 32, Issue 4, April 1999, Pages 359-370 E. Morag, P. R. Cavanagh

[21] https://www.centroortopedicosantandrea.it/news/approfondimenti/la-nascita-dellesame-baropodometrico-un-viaggio-nella-scienza-del-piede

[22] Bamberg, S.; Benbasat, A.Y.; Scarborough, D.M.; Krebs, D.E.; Paradiso, J.A.

[23] Gait analysis using a shoe-integrated wireless sensor system. IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed. 2008, 12, 413–423.

[24]https://archive.unews.utah.edu/news_releases/utah-engineering-prof-invents-smart-insole-to-correct-walking-abnormalities

[25]https://www.researchgate.net/publication/41012629-_In-Shoe_Plantar_Pressure_Measurement_and_Analysis_System_Based_on_Fabric_Pressure_Sensing_Array

[26] https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S09244247183084-34?via%3Dihub

[27]https://www.researchgate.net/publication/339192044_A_Systematic_Approach_to_the_Design_and_Characterization_of_a_Smart_Insole_for_Detecting_Vertical_Ground_Reaction_Force_vGRF_in_Gait_Analysis

[28] Carbon Fiber-Based Smart Plantar Pressure Mapping Insole System for Remote Gait Analysis and Motion Identification, capitolo curato da Li et al., Advanced Materials Technologies, Wiley, 2023

[29] A Study on New Arduino NANO Board for WSN and IoT Applications, C. V. S. Suresh, ResearchGate, 2020

[30] https://en.wikipedia.org/wiki/Arduino_Nano

[31]https://www.moreware.org/wp/blog/2020/04/30/utilizzo-sensori-di-pressione-di-forza-e-di-carico

[32] Force Sensing Resistors, Butler Technologies, Butler Technologies Blog, 2020

[33] SparkFun Electronics, FSR Force Sensing Resistor Integration Guide and Evaluation parts Catalog

[34] R.C.Jaeger, T. N. Blalock, Microelettronica, V edizione, McGraw-Hill, 2018

[35] Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 82, Febbraio 2018

[36]https://www.batteries4pro.com/it/BATTERIE/Alcalina/varta/1-5-v/lr6-aa/3,17781-4-batterie-alcaline-lr06-industrial-pro-varta-4008496356553.html

[37] https://www.sensormedica.com/it/flexinfit

[38] https://www.researchgate.net/figure/Sensor-layout-a-Win-pod-footprint-model-printed-at-a-1-1-scale-with-the-9-peak_fig2_309145072

[39] https://fashionandtextiles.springeropen.com/articles/10.1186/s40691-020-00234-5

[40] SmartStep: A Fully Integrated, Low-Power Insole Monitor, G. Terracina, A. Misino, A. Malcevschi, F. Pirotti, MDPI Electronics, 2014

[41] https://it.xsensor.com/solutions-and-platform/human-performance/clinical-gait-analysis-insoles

[42] https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34732484/

[43] https://www.mordorintelligence.it/industry-reports/foot-orthotics-insoles

[44] Occhiocupo F., Certificazione di un prodotto e analisi dei costi di un dispositivo medico, Luglio 2011

[45] https://www.hardware-x.com/article/S2468-0672(24)00083-X/fulltext

[46] https://www.sensormedica.com/it/freemed

[47] https://www.orthobit.it/plantari-sportivi-milano

[48] https://www.gpem.net/prodotti/xsensor

[49] https://sports.salted.ltd/en/product/smart-insole

[50] https://www.golfswingsystems.co.uk/product/salted-golf-smart-insole

[51] Latsch, B., Herbst, F., Suppelt, M., Seiler, J., Schaumann, S., Suppelt, S., Altmann, A. A., Grimmer, M., & Kupnik, M., A Review of Sensor Insoles, Cornell University, 2025