



**POLITECNICO DI MILANO**

Facoltà di Ingegneria dei Sistemi

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Biomedica

**IMPLEMENTAZIONE DI UN MODELLO  
COMPUTAZIONALE PER LO STUDIO DELLE  
PROPRIETÀ DI SHOCK ABSORPTION  
DI CALZATURE DA CORSA**

Relatore: Prof.re Renato Rodano

Correlatori: Dott. Ing. Francesco Maffessanti

Dott. Ing. Ezio Preatoni

Dott. Ing. Emiliano Votta

Tesi di Laurea di:

Garancini Paolo

matr. 711519

Anno Accademico 2009 – 2010



# Ringraziamenti

Brevemente, pochi ma sentiti ringraziamenti:

- Pilot Italia S.p.A., per il tempo ed il materiale messi a disposizione nella realizzazione del rilievo fotopolimerico;
- Fabio Garancini, per l'assistenza meccanica alla costruzione del timbro usato per applicare i *marker* ottici sulla calzatura;
- Luca Cevasco, figura di riferimento al CNR per le scansioni laser;
- il Prof. Minetti della Facoltà di Fisiologia dell'Università degli Studi di Milano ed i suoi assistenti, per la disponibilità dimostrata nel Laboratorio di Analisi del Movimento;
- Francesco Maffessanti, Ezio Preatoni, Emiliano Votta e l'intero gruppo Giovani Bioingegneri, per la pazienza e le competenze condivise;
- la mia Famiglia, per il continuo supporto;
- Danilo Gioia, per il prezioso aiuto.





# Indice

Indice delle figure	pag. 7
Indice delle tabelle	pag. 12
Indice dei grafici	pag. 14
Sommario	pag. 15
Abstract	pag. 23
<b>Capitolo 1 – Introduzione</b>	pag. 31
1.1 Introduzione	pag. 32
1.2 Metodi di indagine classica	pag. 35
1.3 Studi precedenti	pag. 37
1.4 Obiettivi dello studio	pag. 65
<b>Capitolo 2 – Metodi e strumenti</b>	pag. 68
2.1 Panoramica dello studio	pag. 69
Parte sperimentale	
2.2.1 Preparazione della calzatura	pag. 74
2.2.2 Sistema sperimentale di simulazione impatti	pag. 77
2.2.3 Acquisizioni ottiche ad alta frequenza	pag. 81
2.2.4 Acquisizione di cinematica e cinetica	pag. 85
2.2.5 Valutazione della deformazione di superficie	pag. 87
2.2.6 Indice di massa efficace	pag. 94
Parte computazionale	
2.3.1 Costruzione del modello geometrico	pag. 97
2.3.2 Modellazione numerica	pag. 102
2.3.3 Studio di sensitività	pag. 107

<b>Capitolo 3 – Risultati</b>	..... pag. 112
3.1 Massa efficace	..... pag. 113
3.2 Deformazioni superficiali	..... pag. 115
3.3 Carichi al terreno	..... pag. 119
<b>Capitolo 4 – Conclusioni</b>	..... pag. 122
4.1 Validazione del metodo	..... pag. 123
4.2 Conclusioni, limiti dello studio e prossime evoluzioni	..... pag. 125
Bibliografia – Testi, pubblicazioni e articoli	..... pag. 129
Bibliografia – Siti web	..... pag. 135

## Indice delle figure

#	Didascalia	pag.
1	energia assorbita dalle due calzature in funzione della distanza percorsa. I grafici permettono il confronto tra le casistiche di carico in vivo e la simulazione in vitro.	39
2	i sistemi di smorzamento a colonne implementati nelle calzature oggetto dello studio. Modello A (a sinistra) e Modello B (a destra).	40
3	la componente verticale della forza di reazione vincolare misurata per uno dei soggetti partecipanti allo studio.	41
4	la struttura di simulazione di impatti ( <i>shoe-drop model</i> ) utilizzata dagli autori nella loro indagine comparativa.	43
5	il modello geometrico 2D di Lemmon et al. (1997), comprensivo di strutture ossee e tessuti molli plantari. La lunghezza complessiva del modello è di 90 mm, mentre la cella di calcolo media copre una superficie di 3.7 mm <sup>2</sup> .	49
6	picchi di pressione plantare in funzione dello spessore di soletta interna. Gli andamenti rappresentati permettono il confronto tra i risultati previsti tramite modellazione numerica e quelli misurati con solette di pressione, in entrambi gli scenari fisiopatologici.	52
7	il modello geometrico di Verdejo e Mills (2004) utilizza condizioni di simmetria assiale per ridurre la complessità tipica di una formulazione completamente 3D. La griglia di calcolo applicata per la discretizzazione del modello è rappresentata in configurazione indeformata.	53
8	sforzo di compressione [MPa] in direzione verticale per un affondamento di 10.2 mm, corrispondente ad un carico nodale pari a 502 kN.	55
9	i tre fattori che definiscono i 27 design di <i>insole</i> oggetto dello studio e relative parametrizzazioni. Per il grado di congruenza (A) sono ammessi profili a conformità incrementale mentre lo spessore (B) è stato quantificato in 6.3, 9.5 e 12.7 mm. Le curve sforzo/deformazione associate ai materiali contemplati (C) ne mettono in luce le caratteristiche distintive a livello di risposta	56

- meccanica.
- 10 modello geometrico 2D implementato nello studio di Goske et al. (2006) per 57  
indagare l'efficacia di differenti solette interne nello smorzamento delle  
pressioni a livello calcaneare. Il modello è in grado di descrivere in modo  
potenzialmente accurato gli sforzi e le deformazioni limitatamente alla  
sezione del complesso piede – calzatura considerata, ma non può fornire una  
descrizione completa della fenomenologia di impatto.
  - 11 il modello proposto da Cheung e Zhang (2005) si distingue per l'accuratezza 59  
riposta nella modellazione delle strutture anatomiche di interesse,  
comprensiva di tessuti molli esterni (A), ossa e legamenti (B). Le due  
geometrie di *insole* indagate nello studio (C) presentano morfologie  
marcatamente differenti.
  - 12 distribuzioni di pressione plantare previste dal codice numerico nei casi di 62  
*insole* piatta (*flat*) e conforme al piede (*custom-molded*) con materiali a  
rigidezza incrementale ( $E_{PU} = 0.3 \text{ MPa}$ ;  $E_{EVA} = 1.0 \text{ MPa}$ ;  $E_{PP} = 1.0 \text{ GPa}$ ).
  - 13 nello schema sono rappresentati i tasselli e le relazioni logiche fondamentali 70  
che hanno caratterizzato il percorso affrontato. Sono evidenziati in **blu** gli  
strumenti utilizzati (Kistler 9281 CA → piattaforma dinamometrica; Miro 2M  
→ *high speed digital camera*; Vicon MX → sistema optoelettronico per  
l'acquisizione del movimento; 3DLS Laser Scanner → scanner a lama di luce  
laser), in **rosso** i risultati estrapolati ed in **verde** gli obiettivi finali di  
validazione. Al fine di facilitare la comprensione dello sviluppo del lavoro si  
invita a fare riferimento a questo schema ogniqualvolta lo si ritenga  
necessario.
  - 14 disposizione della strumentazione nel laboratorio. Particolare attenzione è 73  
stata riposta nel posizionamento della struttura di sospensione e sgancio, in  
modo che non influisse sulle acquisizioni cinetiche. Sia in fase di calibrazione  
che durante le acquisizioni, è stato utilizzato un faretto ( $P_{\text{FARETTO}} = 150 \text{ W}$ )  
montato su treppiedi per garantire una sufficiente illuminazione.
  - 15 il timbro rotante utilizzato nell'applicazione dei *marker* ottici sul tacco della 75  
calzatura indagata. Nell'ingrandimento è visibile la caratteristica puntinatura

- del rilievo matriciale realizzato a fotopolimero.
- 16 l'utilizzo del timbro rotante ha permesso di applicare i *marker* ottici sulla calzata con regolarità. 75
- 17 l'apparato sperimentale utilizzato nelle simulazioni di impatto ammette un'espressione cinematica semplice per la riproduzione artificiale della sola fase di *heel strike*. Sulla struttura A è montato il dispositivo di sospensione e sgancio, realizzato con un'elettrocalamita ad altezza  $h$  regolabile. Connesso a questa tramite un apposito elemento ferromagnetico, il braccio di leva B del simulatore e la sua terminazione C. La regolazione di  $\alpha$  e la modulazione del carico addizionale  $m$  consentono di personalizzare gli eventi di impatto in base alle esigenze. 79
- 18 rappresentazione schematica della disposizione relativa tra simulatore di impatti ed HS DC. La distanza interposta è di 1 m; l'asse ottico della telecamera è ortogonale al piano di escursione del braccio dell'IS. 81
- 19 calibrazione statica per la telecamera ad alta risoluzione temporale. In entrambe le sessioni di calibrazione statica e dinamica la frequenza di campionamento è stata limitata a 20 Hz. 82
- 20 la procedura di inseguimento in calibrazione dinamica. Ogni elemento circolare sul supporto viene identificato in posizione tramite le coordinate del centroide associato; le scie rappresentano la storia di tali posizioni, limitata ai precedenti 20 *frame*. 84
- 21 il protocollo di acquisizione della cinematica ha previsto l'applicazione di due soli *marker* rifrangenti sul braccio dell'IS per la cattura della sua escursione angolare. 85
- 22 mappa concettuale dell'algoritmo deputato al riconoscimento dei *marker* ottici applicati alla suola. L'indice  $i$  scorre i *marker* mentre  $n$  identifica il *frame*. 88
- 23 risultato di identificazione dei *marker* operata dallo *script* per il generico *frame*  $n$ . Come visibile in figura, alcuni *marker* del tacco vengono esclusi dal riconoscimento per incompatibilità prospettica con la posizione della telecamera, responsabile di valori di cross-correlazione inferiori alla soglia. In questo caso il codice ha identificato con successo 168 *marker* disposti in un

- reticolo  $6 \times 28$ .
- 24 rappresentazione concettuale della mappatura geometrica del generico elemento quadrangolare nel suo progenitore (elemento *master*). Il passaggio al sistema di riferimento locale consente una scrittura comoda delle funzioni di forma per l'interpolazione degli spostamenti noti ai vertici e la conseguente estrazione del campo di deformazioni. 92
- 25 lo scanner a lama di luce laser ( $\lambda = 650 \text{ nm}$ ) utilizzato per l'acquisizione della geometria della calzatura. La risoluzione spaziale con la calibrazione adottata è di 0.5 mm; nel sensore è integrato un filtro passabanda centrato sulla frequenza corrispondente a  $\lambda$  ( $f_{PB} = 4.612 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ ), utile ad escludere interferenze dovute a radiazioni elettromagnetiche di differente contenuto energetico. Indipendentemente da questo accorgimento *hardware*, le scansioni sono state eseguite in ambiente riparato in modo tale da limitare a priori i disturbi della radiazione ambientale solare. Il sistema di irradiazione è assistito da un motore in continua che controlla il beccheggio della sorgente di luce laser; l'albero di tale motore è accoppiato con un *encoder* per una trasduzione quantizzata della sua rotazione. I comandi al motore vengono impartiti dall'*hardware* interno (a destra), una mini EPIA con sistema operativo *custom* Linux. L'operatore interagisce con lo scanner attraverso un'interfaccia grafica su *touch screen*, tramite la quale è possibile regolare i parametri di acquisizione. 98
- 26 la struttura di simulazione impatti è stata schematizzata nel modello computazionale mantenendo i soli dettagli dimensionali essenziali a garantire compatibilità cinematica tra l'IS fisico e la sua controparte virtuale. Tale strategia modellistica è stata adottata per ragioni di semplicità. Tutte le lunghezze riportate sono espresse in mm. 100
- 27 il modello geometrico dell'IS implementato nelle simulazioni computazionali. Si individuano facilmente i quattro sottoelementi che lo compongono: (A) il braccio di leva del simulatore, semplificato rispetto al reale ma dimensionalmente rigoroso; (B) la terminazione pediforme e (C) la suola, entrambe ricostruite a partire da scansioni laser; (D) il parallelepipedo 101

rappresentativo della piattaforma dinamometrica in corrispondenza della quale avviene l'impatto.

---

## Indice delle tabelle

#	Didascalia	pag.
1	media ( $\pm$ deviazione standard) dell'energia assorbita dai 25 modelli di calzatura indagati in funzione della distanza simulata e corrispondente indice percentuale riferito alla misura iniziale di $E_{ASSORBITA}$ . Per non trascurare potenziali effetti di recupero delle proprietà di <i>shock absorption</i> legati ad un'attività di corsa inevitabilmente discontinua per il chilometraggio considerato, in corrispondenza di ogni traguardo parziale di distanza simulata è stato rispettato un periodo di riposo per le calzature di minimo 24 h prima di procedere alla valutazione dell'energia assorbita.	38
2	media ( $\pm$ deviazione standard) dei parametri di GRF durante l'esecuzione dei <i>trial</i> suddivisi in funzione del modello di calzatura. I dati sono stati normalizzati sul peso dei soggetti al fine di consentire il confronto interindividuale; i valori medi tengono conto delle grandezze estratte per nove dei 10 soggetti analizzati: durante la sperimentazione un soggetto ha mostrato una costante tendenza ad appoggiare il terreno con la regione del mesopiede, pertanto le acquisizioni contestuali sono state trascurate. Gli apici denotano una differenza statisticamente significativa ( $\# \rightarrow p < 0.02$ ; $^{\circ} \rightarrow p < 0.005$ ) tra i modelli.	42
3	media ( $\pm$ deviazione standard) calcolata sui 10 <i>trial</i> eseguiti per ogni modello di calzatura. Gli apici denotano una differenza statisticamente significativa ( $p < 0.05$ ) tra i modelli.	44
4	media ( $\pm$ deviazione standard) dei parametri calcolati sui 120 <i>trial</i> totali, suddivisi per genere dei soggetti e modelli di calzatura. Gli apici denotano una differenza statisticamente significativa ( $p < 0.05$ ) tra i modelli.	46
5	valori dei coefficienti usati per la modellazione numerica della risposta meccanica di PPT e Cloud Crepe.	49
6	previsioni numeriche e misure sperimentali del picco di pressione plantare all'interfaccia piede – <i>insole</i> nelle condizioni di tessuto fisiologico e tessuto	51



	patologico a spessore ridotto.	
7	valori dei coefficienti per la modellazione numerica di EVA e tessuti molli. I parametri relativi al tessuto molle del tallone sono stati identificati tramite interpolazione ottimale di tracciati forza/spostamento prelevati da letteratura specializzata; i coefficienti per l'EVA sono stati quantificati in seguito a misure sperimentali in test di compressione e trazione monoassiali su campioni rappresentativi del materiale.	54
8	valori assunti dai coefficienti per la modellazione numerica dei materiali coinvolti.	58
9	riduzione percentuale del picco pressorio calcaneare nelle 27 casistiche contemplate dallo studio. I valori delle riduzioni si riferiscono alla pressione calcaneare prevista per l'interazione tallone – suolo senza ulteriori elementi interposti (condizione <i>barefoot</i> ).	58
10	parametri per la modellazione meccanica dei materiali utilizzati nel modello FE.	60
11	istantanee della suola nell'istante di massima compressione per le quattro discretizzazioni contemplate nello studio di sensitività. La mappa colorimetrica mostra la distribuzione della componente di deformazione nominale in direzione verticale ( $NE_{22}$ ) sulla geometria della <i>midsole</i> in configurazione indeformata.	108
12	confronto tra deformazioni superficiali ottenute sperimentalmente e simulate al calcolatore per $m = 2$ kg. L'accoppiamento temporale tra i dati, caratterizzati da frequenze di campionamento leggermente differenti ( $f_{HS\ DC} = 1.2$ kHz; $f_{FEA} = 1.0$ kHz), è stato conseguito appaiando i risultati in corrispondenza dell'istante di massima compressione; in seguito, il confronto è stato esteso nel tempo adottando salti temporali compatibili con i <i>frame</i> a disposizione.	116
13	confronto tra deformazioni superficiali ottenute sperimentalmente e simulate al calcolatore per $m = 5$ kg. L'approccio utilizzato per accoppiare nel tempo i dati è il medesimo illustrato in precedenza.	117

---

## Indice dei grafici

---

#	Didascalia	pag.
1	velocità angolari di caduta del braccio dell'IS per i 16 <i>trial</i> acquisiti, suddivisi nelle due casistiche di massa addizionale. Per $m = 2$ kg la dispersione delle curve è contenuta mentre nel caso $m = 5$ kg questo fattore è più significativo: tale manifestazione è probabilmente una conseguenza dell'intervento manuale necessario ad assistere l'elettrocalamita nella sospensione dell'apparato di simulazione per $m = 5$ kg.	105
2	rilevazioni cinetiche (componente verticale) ottenute dalla piattaforma di forza ( $f_{DYN} = 2$ kHz) e le corrispondenti grandezze valutate nelle simulazioni numeriche ( $f_{FEA} = 1$ kHz) per le due casistiche di massa addizionale. $t = 0$ s coincide con l'istante di disinnescamento dell'elettrocalamita.	120

---

# Sommario

## **Scopo del lavoro.**

La valutazione funzionale di un generico prodotto attraverso test su prototipi molto spesso equivale ad intraprendere un percorso lungo, iterativo ed oneroso; nel caso in cui il dispositivo in esame preveda interazioni con l'uomo, l'indagine è ulteriormente complicata da numerose variabili in grado di condizionare tali interazioni, con conseguenti maggiori difficoltà nel pervenire ad un giudizio obiettivo sul prodotto.

Con riferimento specifico al mondo delle calzature sportive, la valutazione sperimentale di prototipi costituisce oggi ancora il principale metodo per indagare la performance globale della calzatura e la sua efficacia nell'assorbimento dinamico, fattore chiave nella prevenzione di infortuni a carico degli arti inferiori.

Il presente studio si pone come obiettivo l'implementazione di una metodologia innovativa e fortemente automatizzata per l'analisi delle proprietà di assorbimento dinamico (*shock absorption*) operato dalle suddette calzature nella regione del retro suola durante la corsa. Tale metodo si basa sull'integrazione di:

- un sistema meccanico per la simulazione degli impatti al suolo (*impact simulator*, IS) (Figura A) in condizioni di alta ripetibilità;

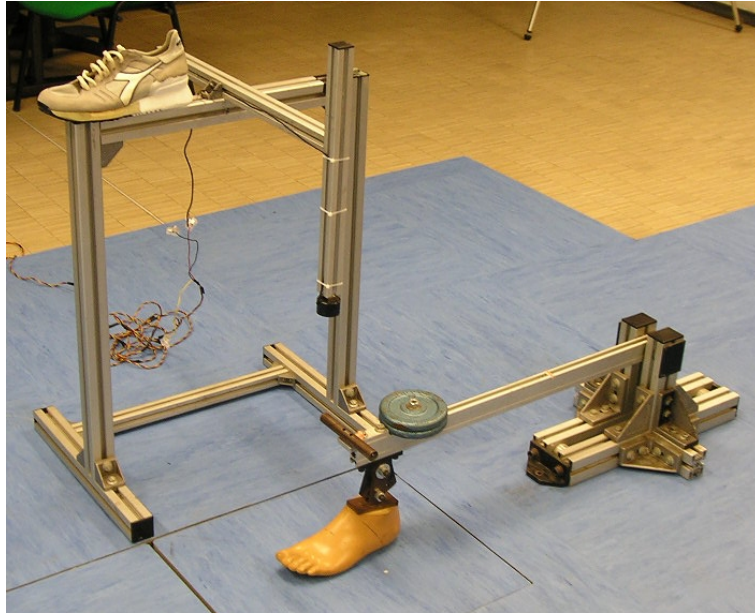


Figura A: il simulatore meccanico adottato permette di riprodurre artificialmente gli impatti al suolo con un alto tasso di ripetibilità.

- acquisizioni ottiche ad elevata risoluzione temporale realizzate con un'opportuna telecamera digitale (*high speed digital camera*, HS DC);
- analisi computazionali basate sulla tecnica degli elementi finiti (*finite element analysis*, FEA).

La visione a lungo termine associata a questo studio trova possibile affermazione in un contesto futuro dove l'industria del settore possa fare affidamento sull'analisi computazionale come fondamentale strumento di comprovata efficacia per la previsione delle proprietà di *shock absorption* espresse in regime di utilizzo dalle calzature. Questa modalità d'indagine consentirebbe di indirizzare la progettazione di calzature ad uso sportivo verso nuovi equilibri tra prestazione e protezione dell'atleta, senza dover ricorrere a numerosi test su prototipi in laboratorio.

### **Materiali e metodi.**

Un modello base di calzatura sportiva è stato sottoposto ad eventi standardizzati di impatto

grazie ad un IS configurato in modo tale da replicare l'angolo all'articolazione tibiotarsica assunto da un *heel striker*<sup>1</sup> medio durante la corsa in prossimità del piano di impatto.

Di questi impatti al suolo sono state eseguite otto ripetizioni, acquisite simultaneamente con (Figura B):

- HS DC (Phantom Miro 2M, VisionResearch, USA);
- sistema optoelettronico per l'analisi del movimento (Vicon MX, Oxford, UK);
- piattaforma dinamometrica (Kistler 9281CA, Winterthur, CH).

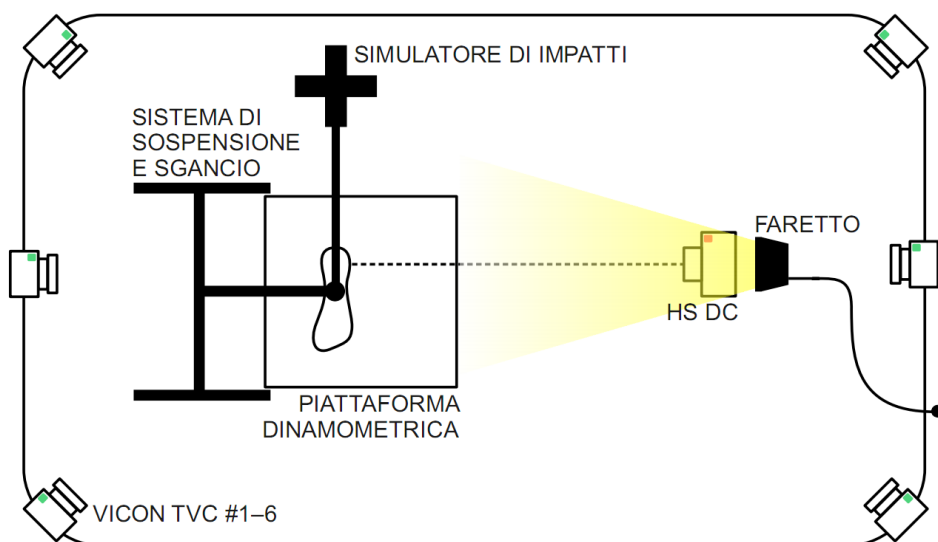


Figura B: disposizione della strumentazione nel laboratorio.

Le acquisizioni video ottenute dalla HS DC sono state analizzate con uno *script* sviluppato in Matlab (The MathWorks, Inc., Natick, MA, USA) che, tramite l'identificazione e l'inseguimento di marcatori ottici ( $\varnothing = 1 \text{ mm}$ ;  $\Delta x = \Delta y = 4 \text{ mm}$ ) precedentemente applicati sulla suola, ha permesso di valutare nel tempo la deformazione superficiale a carico del tacco della calzatura.

Con le acquisizioni optoelettroniche è stata campionata la caduta per gravità del braccio di leva dell'IS in corrispondenza di due *marker* rifrangenti standard ( $\varnothing = 15 \text{ mm}$ ) applicati

<sup>1</sup> Per *heel strike runner* si intende un corridore che attua la fase di appoggio impattando inizialmente il terreno con il tallone, a differenza di *midfoot runner* e *forefoot runner* che impattano col mesopiede e l'avampiede, rispettivamente.

sulla medesima leva. I dati di cinematica sono stati quindi utilizzati per controllare il movimento del modello computazionale.

Quest'ultimo, realizzato con una geometria 3D semplificata rispetto alle controparti reali, è stato implementato nel codice commerciale Abaqus/Explicit v.6.8-1 (Simulia, Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, FR) per replicare al computer gli eventi di impatto ed ottenere una previsione numerica delle stesse componenti di deformazione superficiale valutate con l'analisi video.

Il confronto tra la deformazione superficiale prevista dalla FEA e la corrispondente distribuzione calcolata a partire dalle acquisizioni video ha costituito il fulcro di validazione per la metodologia d'indagine esposta (Figura C).

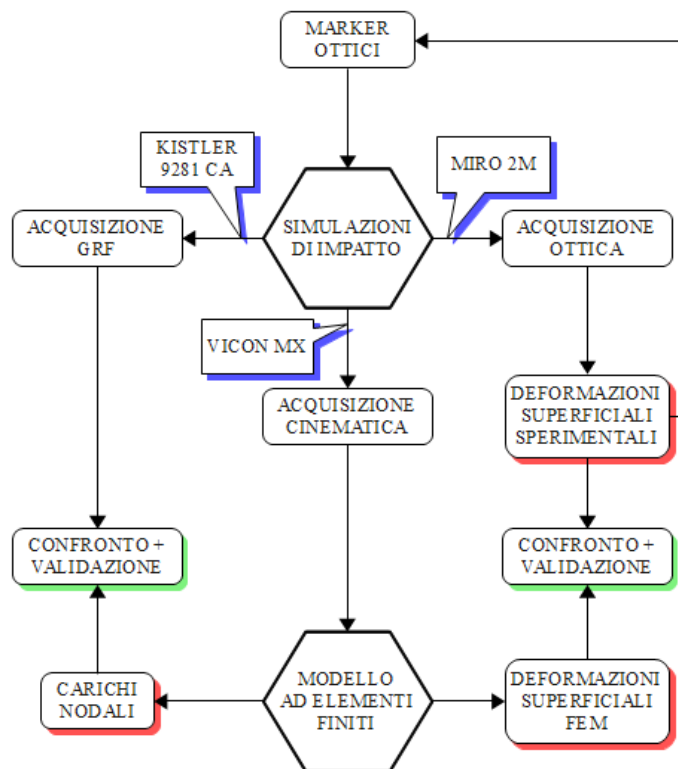


Figura C: nello schema è rappresentato il percorso per la validazione della metodologia d'indagine su base computazionale. Sono evidenziati in blu gli strumenti utilizzati (Kistler 9281 CA → piattaforma dinamometrica; Miro 2M → high speed digital camera; Vicon MX → sistema

optoelettronico per l'acquisizione del movimento), in **rosso** i risultati estrapolati ed in **verde** gli obiettivi finali.

Per rafforzare il processo di validazione sono state inoltre confrontate la reazione vincolare al terreno (*ground reaction force*, GRF) misurata dalla pedana di forza ed i corrispondenti carichi nodali previsti dalla simulazione computazionale.

Grazie alla modularità del sistema meccanico usato nella simulazione degli impatti, quanto finora descritto è stato realizzato per due configurazioni dell'IS differenti per massa addizionale ( $m = 2 \text{ kg}$  e  $m = 5 \text{ kg}$ ).

### **Risultati.**

Il confronto tra i risultati di deformazione superficiale ha evidenziato una buona compatibilità, soprattutto in relazione alla dinamica di sviluppo e riassorbimento nel tempo.

Tuttavia si rileva anche un consistente divario in intensità tra le due distribuzioni (Tabella A), particolarmente evidente nel caso di massa addizionale  $m = 5 \text{ kg}$ . Questo esito è facilmente attribuibile alle limitazioni che hanno caratterizzato tanto l'acquisizione dei dati sperimentali, come la disponibilità di una sola telecamera per l'acquisizione video dei test di impatto, quanto le simulazioni numeriche, come l'assenza di specifiche ufficiali relative a geometria, struttura interna e materiali della suola.

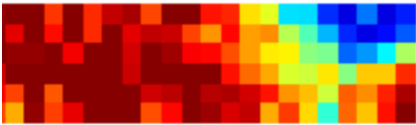
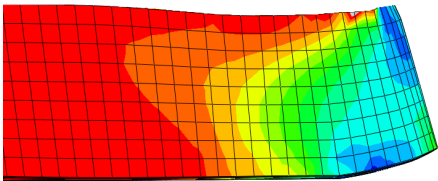
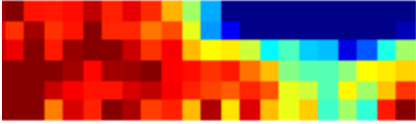
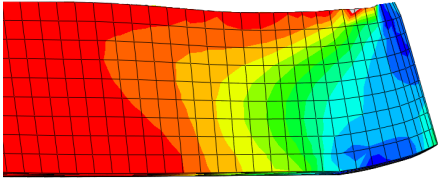
Massa	Analisi video	Analisi FE
m = 2 kg		
m = 5 kg		

Tabella A: deformazioni superficiali della suola (MIN = -0.2362; MAX = 0.01) valutate sperimentalmente (Analisi video) e simulate al computer (Analisi FE). La tabella riporta le distribuzioni di deformazione all'istante di massima compressione per entrambi i casi di massa addizionale.

A causa delle discrepanze riscontrate, questi risultati non autorizzano la sostituzione della tradizionale indagine prototipale con quella condotta al computer, nonostante quest'ultima sia più versatile e ricca in contenuto informativo.

Anche il confronto relativo alle grandezze cinetiche ha riportato differenze significative tra le reazioni vincolari misurate dalla piattaforma di forza ed i carichi nodali previsti dal codice numerico: in entrambi i casi di massa addizionale, la componente verticale della GRF numerica presenta un picco massimo dimezzato (914 N per m = 2 kg; 1042 N per m = 5 kg) ed una durata quasi doppia (31 ms per m = 2 kg e 5 kg) rispetto alla stessa componente misurata durante le sessioni sperimentali (Grafico A).



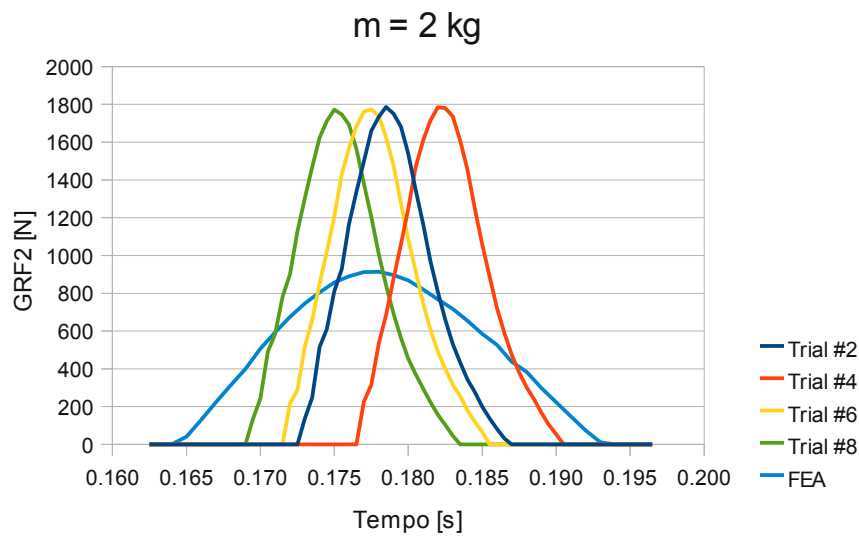


Grafico A: rilevazioni cinetiche (sola componente normale al terreno) ottenute dalla piattaforma di forza e la stessa grandezza prevista dalla simulazione numerica per  $m = 2$  kg.

Queste differenze marcate suggeriscono la presenza di anomalie a livello della cinematica di controllo con un possibile sottocampionamento della stessa, o una formulazione non accurata delle interazioni di contatto.

### Conclusioni.

Il presente studio ha avanzato i primi passi verso una nuova metodologia d'indagine per le proprietà di *shock absorption* di calzature sportive, basata sulla simulazione computazionale di prove standardizzate di impatto.

La deformazione superficiale a carico della suola prevista a mezzo della FEA ha mostrato un'incoraggiante compatibilità con i corrispondenti risultati sperimentali, anche se le incongruenze rilevate sono tali da sospendere, per ora, l'esito finale di validazione.

Tuttavia, tale risultato è facilmente attribuibile alle limitazioni incontrate ed alle ipotesi semplificative adottate.

Un'ulteriore espansione del lavoro finalizzata al superamento di tali limitazioni potrebbe consentire una validazione piena nonché l'identificazione dell'analisi ad elementi finiti

quale potente strumento per l'indagine della performance di calzature sportive. L'utilizzo regolare di questo strumento consentirebbe di quantificare variabili di interesse biomeccanico ed industriale altrimenti inaccessibili a causa della complessità costruttiva della calzatura.

**Parole Chiave.**

Analisi ad elementi finiti, simulazioni di impatto, *shock absorption*, misure ottiche di deformazione, massa efficace.

# Abstract

## **Introduction.**

Functional assessment of a generic device through prototype testing can often turn into a long, iterative and therefore expensive task; if said device allows any interaction with human beings, its objective evaluation could be even more difficult as many variables can deeply affect these interactions.

Talking about sports footwear, experimental evaluation of prototypes is still the main method used to assess a shoe global performance and its shock absorption properties, a key factor in preventing lower limbs injuries.

This study is a first attempt towards a new and heavily automated method conceived to assess shock absorption properties in sports shoe rearfoot areas during running.

The method is based on:

- a mechanical impact simulator (IS) (Figure A) granting high repeatability of performed impact tests;

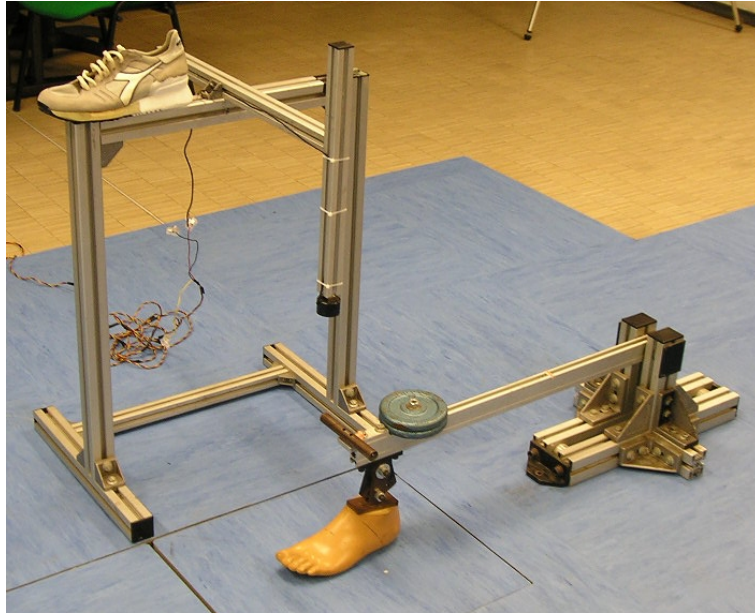


Figure A: the adopted IS allows heel strike phase simulation.

- video recording through an high speed digital camera (HS DC);
- computational finite element analysis (FEA).

Our long-term vision is to empower footwear industry with computational analysis as a reliable tool in shock absorption properties prediction. This assessing method could address sports footwear design towards a new balance between performance and athlete protection, without any need for extensive prototype testing.

### **Methods.**

A basic running shoe was tested under controlled conditions through the formerly introduced IS, which was configured so as to reproduce the typical ankle angle of an average heel striker approaching the ground during running.

The simulated ground impact events were performed eight times due to repeatability issues and were simultaneously acquired with (Figure B):

- the HS DC (Phantom Miro 2M, VisionResearch, USA);
- an optoelectronic motion capture system (Vicon MX, Oxford, UK);

- a force platform (Kistler 9281CA, Winterthur, CH).

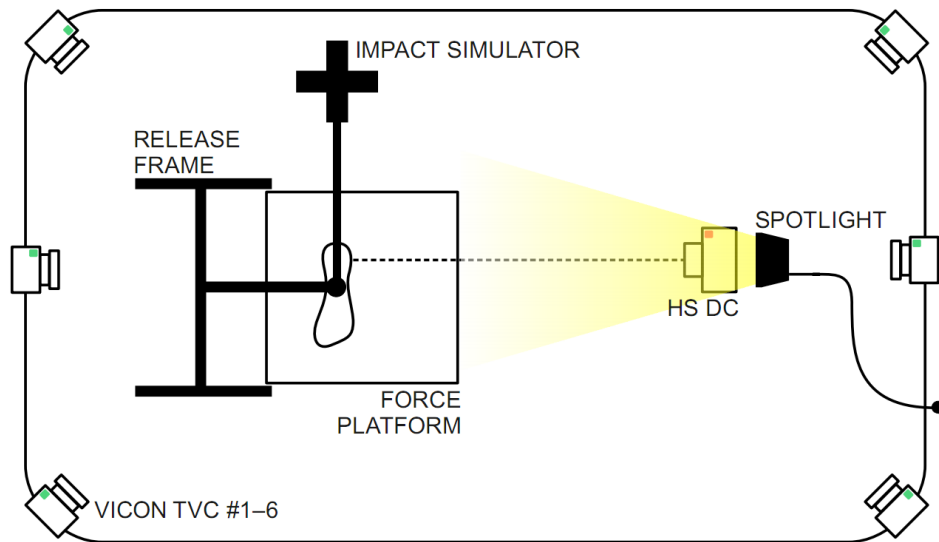


Figure B: experimental set-up in the laboratory.

HS video captures were analysed through a custom Matlab (MathWorks Inc., Natick, MA, USA) script which allowed recognition and tracking of optical markers ( $\varnothing = 1 \text{ mm}$ ,  $\Delta x = \Delta y = 4 \text{ mm}$ ) previously applied on the midsole surface.

The script provided rear shoe surface strains over time.

The optoelectronic motion capture system sampled the IS lever arm fall at two standard reflective markers ( $\varnothing = 15 \text{ mm}$ ): these kinematic data were used to control the computational model.

The latter, built with a 3D simplified geometry, has been implemented in Abaqus/Explicit v.6.8-1 (Simulia, Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, FR) to virtually simulate the very same impact events and predict the midsole surface strains.

Comparison between these FEA predicted strains and those provided by HS video analysis has been regarded as the primary evidence to validate our inquiring method (Figure C).

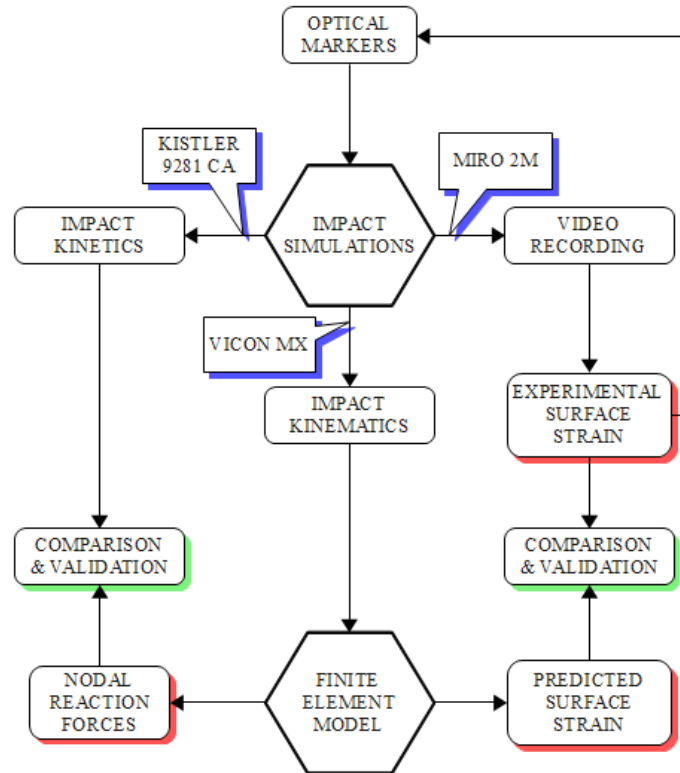


Figure C: block diagram outlining the path towards validation of our computing based inquiring method. The equipment used is highlighted in **blue** (Kistler 9281 CA → force platform; Miro 2M → high speed digital camera; Vicon MX → optoelectronic motion capture system), while results and final goals are highlighted in **red** and **green**, respectively.

In order to strengthen the validation process a further comparison was taken into account between FEA predicted loads and ground reaction forces (GRF) measured through the force platform.

Exploiting the IS modularity, all impact tests and virtual simulations were performed for two different additional mass cases ( $m = 2 \text{ kg}$  e  $m = 5 \text{ kg}$ ).

## Results.

The results of surface strain comparison showed good agreement, especially in terms of strain development over time.

However, they also outlined significant differences in absolute strain values (Table A), clearly visible for  $m = 5$  kg. This outcome could be easily related to the limitations that affected both experimental measurements (availability of a single HS DC) and numerical simulations (lacking of official information regarding midsole geometry, internal structure and materials).

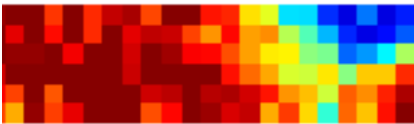
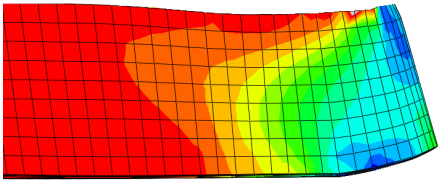
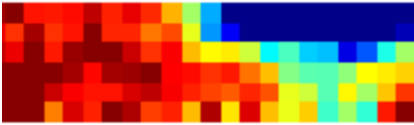
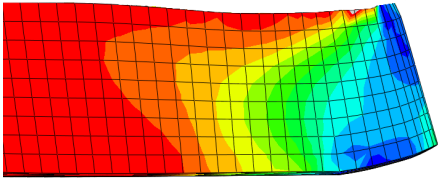
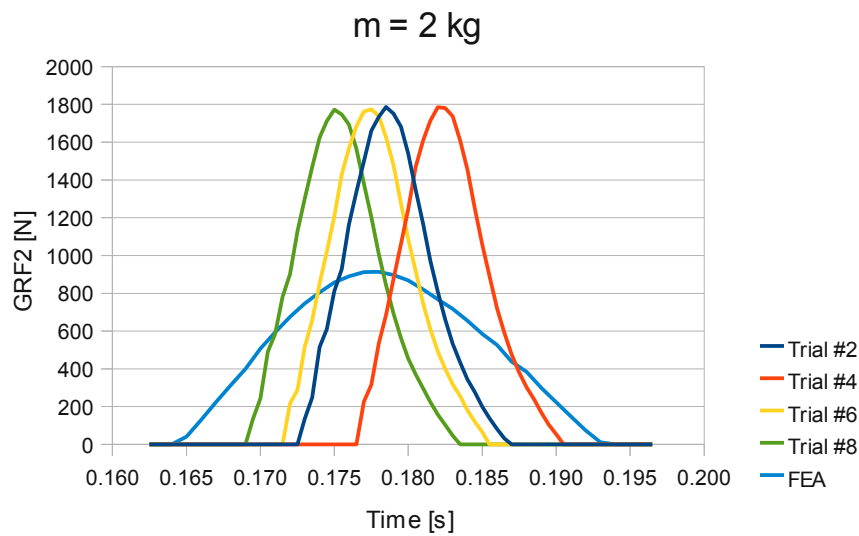
Mass	Video Analysis	FEA
$m = 2$ kg		
$m = 5$ kg		

Table A: experimentally assessed (Video Analysis) and computationally predicted (FEA) midsole surface strains (MIN = -0.2362; MAX = 0.01). The table shows strain distributions at maximum compression for both additional mass cases.

Due to the outlined differences, these results can't allow a prompt replacement of traditional prototype testing with computationally driven analyses, even if the latter is much more versatile and rich.

The comparison between ground reaction forces measured through the force platform and nodal reaction forces predicted by the FEA showed significant differences as well: for both additional mass cases the FEA predicted vertical component of GRF showed a halved peak value (914 N for  $m = 2$  kg; 1042 N for  $m = 5$  kg) and increased duration (31 ms in both cases) if compared to the same force component measured in experimental sessions (Graph A).



Graph A: ground reaction forces (vertical component) measured through the force platform and predicted by numerical simulation for  $m = 2$  kg.

These remarkable differences suggest some kind of fault in boundary conditions or inaccurate formulation of contact interactions.

### Conclusions.

This study walked the first steps towards a newly developed method for assessing sports shoe shock absorption properties, based on computational simulation of standardized impact tests.

Midsole surface strains predicted by the FEA showed an encouraging agreement with experimental results, even though the aforementioned differences as of now freeze the final validation verdict.

However, all equipment restrictions faced and hypotheses taken are likely to be the main responsible for this outcome.

A further expansion of this work could overcome such restrictions and therefore allow a full validation, labeling the FEA as a powerful tool in assessing athletic footwear performance and biomechanical variables otherwise hardly knowable.



**Keywords.**

Finite element analysis, heel strike simulations, shock absorption, optical strain measures, effective mass.



# Capitolo 1

## INTRODUZIONE

In questo capitolo si fornisce una breve introduzione descrittiva, corredata dal bagaglio culturale di riferimento e dalle motivazioni che hanno giustificato l'indagine metodologica intrapresa.

Successivamente si esplorano i paradigmi classici per l'analisi del sistema uomo – calzatura e studi di letteratura associati, reclamando l'originalità dell'approccio adottato e dichiarando esplicitamente le finalità del lavoro.

## 1.1 Introduzione

Studi epidemiologici hanno messo in evidenza come infortuni correlati all'attività sportiva, ed in particolar modo alla corsa, possano colpire ogni anno dal 37% al 56% dei praticanti, indipendentemente dal fatto che si tratti di atleti professionisti od amatoriali (Cavanagh, 1980; van Mechelen, 1992; McClay, 2000). Tipicamente, in conseguenza di tali infortuni si è costretti ad interrompere l'allenamento con effetto immediato.

Nei casi più gravi risulta necessario sottoporsi ad interventi medico chirurgici e rispettare i programmi di recupero e/o riabilitazione prescritti (Cavanagh, 1980).

Diversi autori hanno cercato di identificare i fattori responsabili di tali infortuni (Cavanagh, 1980; McClay, 2000; Nigg et al., 2005; Bruggermann, 2006; Hennig, 2006; Hennig, 2008) studiando le mutue interrelazioni tra proprietà delle calzature, performance biomeccanica e salute.

Tali indagini hanno portato ad identificare eccessive forze all'impatto e relative propagazioni di fronti di sollecitazione meccanica (Dickinson et al., 1985; Smeathers, 1989) come importanti agenti eziologici di infortuni a carico del sistema muscolo-scheletrico e di patologie degenerative articolari (Cavanagh, 1980; McClay, 2000; Nigg et al., 2005; Bruggermann, 2006; Hennig, 2006; Hennig, 2008).

Questo risultato è legato alle seguenti constatazioni:

- la relativa preponderanza di soggetti che attaccano il suolo preferenzialmente col tallone (*heel striker*) nell'intera popolazione di corridori abitudinari (McClay, 2000);
- la continua sollecitazione plantare durante la corsa;
- la significativa intensità delle grandezze cinetiche in gioco all'*heel strike* (Denoth, 1986; Nigg et al., 1995).

La connessione funzionale tra meccanica della corsa ed infortuni correlati necessita

tuttavia di ulteriori indagini finalizzate ad una completa comprensione dei fenomeni coinvolti (McClay, 2000; Nigg et al., 2005; Bruggermann, 2006).

Tale difetto di conoscenze è principalmente imputabile a due aspetti (McClay, 2000; Hamill et al., 2006):

- le numerose sfaccettature che caratterizzano in modo unico ogni infortunio legato alla corsa (intensità, frequenza e durata dell'allenamento, strategie personali adottate nell'esecuzione dei movimenti, fattori strutturali e biomeccanici individuali, l'interazione con differenti superfici di appoggio mediata dall'uso di differenti calzature);
- le insormontabili difficoltà nell'impostare e rimanere fedeli a disegni di studio longitudinali, a mezzo dei quali stabilire relazioni di causa ed effetto tra le specifiche espressioni locomotorie adottate e gli infortuni contratti.

Indipendentemente da questi ostacoli conoscitivi, la sopracitata correlazione tra sovrasollecitazioni cinetiche ed infortuni rimane verosimile: nell'intero spettro delle discipline atletiche e sportive, l'utilizzo universale di calzature ad hoc in virtù delle loro proprietà di smorzamento dei carichi all'impatto convalida questo risultato.

Un'adeguata calzatura per la corsa (*running shoe*) vorrebbe proteggere l'intero apparato muscolo-scheletrico da sollecitazioni eccessive e ridurre il rischio di infortuni; al tempo stesso vorrebbe assicurare all'atleta un buon livello di comfort, offrendo le condizioni necessarie per un'espressione atletica completa ed un potenziale miglioramento della performance sportiva (Hennig, 2008).

Questa consapevolezza ha alimentato il presente studio, focalizzato sulla definizione di una metodologia innovativa per la caratterizzazione di calzature sportive nelle condizioni di carico tipiche dell'*heel striker* durante la corsa. Sebbene il sistema adottato a tale scopo presenti un livello di complessità ridotto rispetto alla realtà che vorrebbe rappresentare (vedi Capitolo 2, "Metodi e strumenti") ciò non ha ripercussioni sulla correttezza formale dell'approccio in quanto lo studio non si pone obiettivi di realismo.

La speranza ultima è quella di poter fornire all'industria del settore un efficace strumento di

indagine e previsione delle proprietà di smorzamento espresse in regime di utilizzo dalle calzature stesse, qualunque sia la natura degli eventuali inserti concepiti per gestire l'ammortizzazione dei carichi. Un utilizzo regolare di tale strumento consentirebbe di indirizzare efficacemente la progettazione delle calzature ad uso sportivo verso nuovi equilibri tra prestazione e protezione.

## 1.2 Metodi di indagine classica

Classicamente si possono individuare tre diverse modalità per indagare l'impatto al suolo del sistema uomo – calzatura durante la corsa.

Cavanagh (1980) ha cercato di fornirne una prima descrizione esaustiva, mettendo in luce punti di forza e limitazioni caratteristiche di ciascun approccio:

- la misura tramite piattaforma dinamometrica delle modalità con cui le forze vengono trasmesse dal piede, passando per la calzatura, fino al terreno. Questa modalità di indagine, seppur valida, tende a fornire informazioni sintetiche: l'impatto del sistema al suolo, cinematicamente descritto tramite vettore di forza e centro di pressione, assume le connotazioni di un'interazione puntuale laddove invece la superficie di contatto possiede un'estensione finita. Inoltre, nel caso specifico di misurazioni in vivo, è richiesto un elevato numero di acquisizioni al fine di tamponare la variabilità intraindividuale con cui il soggetto esegue il movimento;
- la valutazione tramite accelerometri degli effetti dell'impatto sugli arti inferiori e, conseguentemente, sull'intero corpo. Tale modalità di indagine sposta l'attenzione principalmente sul lato umano, subordinando lo studio delle proprietà di ammortizzazione della calzatura. Per di più, sperimentazioni di questo tipo risultano sempre molto delicate sia per l'assenza di un rigoroso protocollo di acquisizione che sancisca inequivocabilmente le modalità di misurazione, sia per la difficile estrapolazione a livello globale di misure locali di accelerazione. A complicare ulteriormente questo approccio, la naturale contrapposizione tra l'esecuzione di misure invasive, molto più accurate, e misure di superficie, compromesse dagli artefatti indotti da tessuti molli;
- l'utilizzo di simulatori di impatto con cui, escludendo il fattore umano presente nelle modalità sopra descritte, è possibile sbilanciare l'indagine sulla calzatura. Il sistema di simulazione, classicamente realizzato secondo il paradigma *shoe-drop model* (Flores e Smith, 2004), se da un lato consente studi parametrici su specifici inserti modulari della calzatura ed offre alti gradi di controllo e ripetibilità,

dall'altro non è in grado di replicare fedelmente il movimento umano, i caratteristici schemi di controllo motorio e l'adattamento dei tessuti nel tempo.

Nonostante le differenze sopra riportate esiste un aspetto che accomuna questi approcci, ovvero la natura macroscopica delle grandezze cinematiche e cinetiche misurabili: tali variabili descrivono quantitativamente il movimento (cinematica articolare, accelerazioni) e le interazioni col mondo esterno (forze, distribuzioni di pressione, momenti articolari) di un sistema in realtà costituito da più elementi aggregati ed interagenti tra loro.

A partire da queste considerazioni, risulta evidente la necessità di paradigmi di indagine e strumenti di analisi più raffinati.



## 1.3 Studi precedenti

### **Studi sperimentali.**

L'indagine del sistema uomo – calzatura e delle proprietà di *shock absorption* di queste ultime non può tuttavia prescindere da sperimentazioni classiche.

Cook et al. (1985) hanno esaminato un'ampia serie di calzature da *running* (25 modelli commercializzati da 12 produttori) per valutare empiricamente variazioni nell'efficacia di *shock absorption* in relazione alla distanza percorsa.

Alcuni tra i modelli selezionati per lo studio, di prezzo variabile da 20 \$ fino ad oltre 100 \$, prevedevano inserti fluidi nel tallone, lamine in fibra di vetro od elementi realizzati con materiali compositi.

Le scarpe sono state calzate su un piede protesico, solidale ad un banco di prova ad azionamento idraulico (MTS Systems Corp., Minneapolis, MN, USA) e regolato con un angolo di 15° rispetto al piano orizzontale in modo da garantire il contatto in corrispondenza del tacco della scarpa. La sollecitazione meccanica è stata realizzata in controllo di carico e modellata su un'onda pulsante dallo zero di intensità 150 kg e frequenza 2.5 Hz.

L'efficacia dello *shock absorption* è stata valutata indirettamente tramite il calcolo dell'energia assorbita dalla calzatura ad intervalli regolari di corsa simulata (0, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300 e 500 miglia) (Tabella 1). Ogni miglio è stato quantificato in 805 cicli di carico, conseguentemente all'approssimazione della falcata ad 1 m.

Miglia	$E_{\text{ASSORBITA}}$ [Nm]	%
0	10.5 ( $\pm$ 1.4)	100 ( $\pm$ 0.0)
5	9.0 ( $\pm$ 1.0)	86.2 ( $\pm$ 5.6)
10	8.8 ( $\pm$ 1.0)	83.9 ( $\pm$ 7.5)
25	8.1 ( $\pm$ 0.8)	78.0 ( $\pm$ 5.2)
50	7.4 ( $\pm$ 0.5)	73.0 ( $\pm$ 4.6)
75	7.1 ( $\pm$ 0.5)	70.6 ( $\pm$ 4.6)
100	6.9 ( $\pm$ 0.5)	67.8 ( $\pm$ 6.0)
125	6.8 ( $\pm$ 0.4)	66.7 ( $\pm$ 6.7)
150	6.6 ( $\pm$ 0.4)	65.8 ( $\pm$ 6.7)
200	6.4 ( $\pm$ 0.4)	62.3 ( $\pm$ 5.4)
250	6.1 ( $\pm$ 0.5)	59.6 ( $\pm$ 7.5)
300	5.8 ( $\pm$ 0.4)	57.2 ( $\pm$ 7.5)
500	5.5 ( $\pm$ 0.5)	53.2 ( $\pm$ 6.1)

Tabella 1: media ( $\pm$  deviazione standard) dell'energia assorbita dai 25 modelli di calzatura indagati in funzione della distanza simulata e corrispondente indice percentuale riferito alla misura iniziale di  $E_{\text{ASSORBITA}}$ . Per non trascurare potenziali effetti di recupero delle proprietà di *shock absorption* legati ad un'attività di corsa inevitabilmente discontinua per il chilometraggio considerato, in corrispondenza di ogni traguardo parziale di distanza simulata è stato rispettato un periodo di riposo per le calzature di minimo 24 h prima di procedere alla valutazione dell'energia assorbita.

Per proporre una validazione dei risultati ottenuti in laboratorio, due modelli di calzatura contemplati nel campione originale (genericamente identificati come Calzatura 1 e Calzatura 2) sono stati sottoposti anche a sperimentazioni in vivo grazie a due soggetti volontari (64 e 73 kg; *heel striker*;  $v_{\text{CORSIA}} = 3.83 \text{ ms}^{-1}$ ). Entrambi i corridori sono stati giudicati in buona salute e non hanno manifestato controindicazioni cliniche allo studio.

I soggetti hanno utilizzato le calzature fornite per il loro allenamento quotidiano, restituendole al laboratorio approssimativamente in corrispondenza degli stessi intervalli di attività sopra riportati. I grafici seguenti (Figura 1) sintetizzano il confronto tra l'indagine in vivo e la sperimentazione in vitro.

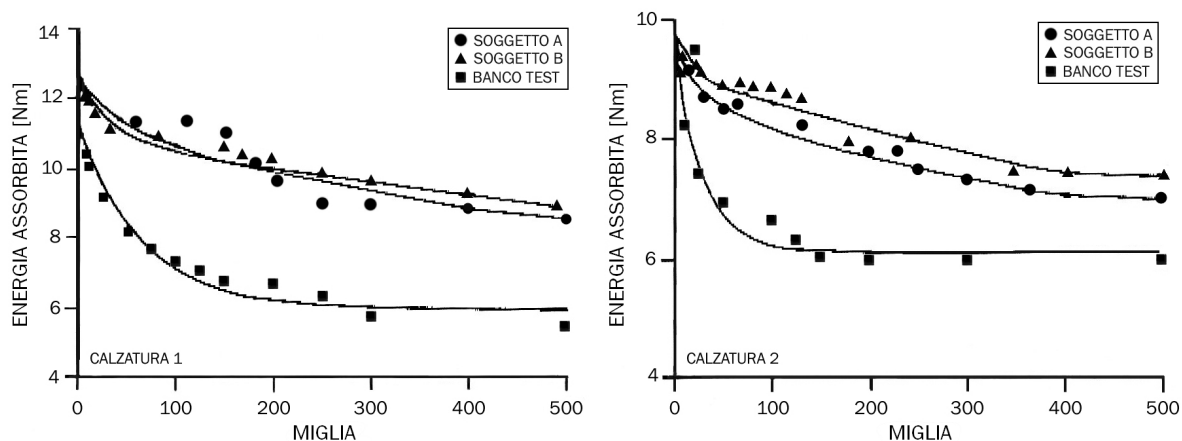


Figura 1: energia assorbita dalle due calzature in funzione della distanza percorsa. I grafici permettono il confronto tra le casistiche di carico in vivo e la simulazione in vitro.

I risultati numerici ottenuti dalle simulazioni meccaniche hanno evidenziato un decadimento dello *shock absorption* comune a tutte le calzature, pur mostrando queste ultime una capacità iniziale di assorbimento di energia variabile. Questo esito ha consentito di escludere il fattore prezzo come predittore di una maggiore o minore efficacia nell'assorbimento dei carichi. La degradazione di performance delle calzature può essere imputata all'etilenvinilacetato (EVA) o in generale alla combinazione dei diversi materiali usati nella realizzazione delle soles.

I risultati relativi alla sperimentazione in vivo, oltre a testimoniare l'indipendenza dal peso del corridore, registrano decadimenti meno accentuati per le proprietà di *shock absorption* delle calzature, con un assorbimento di energia fino al 25% superiore rispetto a quanto valutato su banco di prova a parità di altre condizioni.

La consistente differenza tra sperimentazioni in vivo ed in vitro può dipendere da numerosi fattori tra cui l'incapacità dell'apparato di simulazione di riprodurre l'andatura tipica di un corridore umano, le differenti superfici di impatto (piano rigido per le sperimentazioni in laboratorio; superfici a rigidità variabile per i test di controllo in vivo) e l'intrinseca compliance dei tessuti molli del corpo umano.

In conclusione, sebbene la simulazione in vitro fornisca andamenti credibili per il

degradamento progressivo dello *shock absorption* delle calzature, il protocollo utilizzato necessita di correzioni finalizzate ad una maggior verosimiglianza dei risultati. Al tempo stesso, lo studio ha evidenziato come i differenti design analizzati e la combinazione di diversi materiali nella suola abbiano minime ripercussioni sulle proprietà di assorbimento dinamico a breve, medio e lungo termine.

Più recentemente Aguinaldo et al. (2002) hanno impostato un'indagine comparativa su tre calzature per valutare gli effetti di differenti soluzioni costruttive sull'andamento della componente verticale della forza di reazione al terreno (*ground reaction force*, GRF) durante la corsa.

Le calzature indagate presentavano retro suola con i seguenti sistemi di smorzamento:

- struttura a quattro colonne in poliuretano (Modello A) (Figura 2);
- sistema a quattro colonne cave in poliestere termoplastico a morfologia troncoconica (Modello B) (Figura 2);
- monoblocco in schiuma di etilenvinilacetato (EVA) di formulazione proprietaria (Modello C).

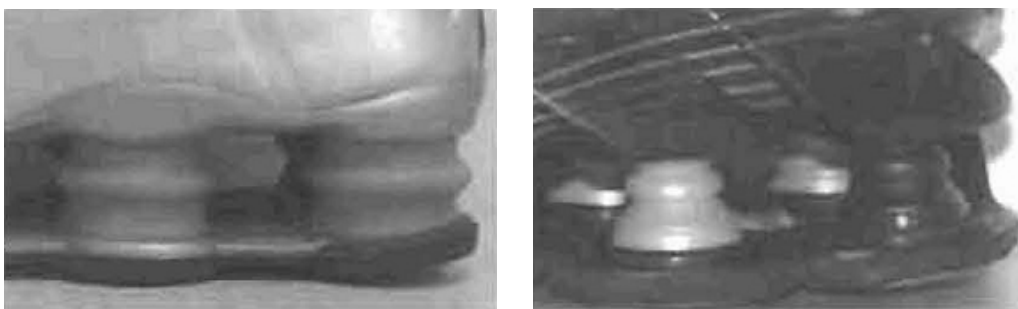


Figura 2: i sistemi di smorzamento a colonne implementati nelle calzature oggetto dello studio. Modello A (a sinistra) e Modello B (a destra).

Gli autori hanno reclutato una popolazione di 10 corridori (otto maschi e due femmine) occasionali (attività sportiva per massimo 10 miglia/settimana), di altezza  $181 \pm 4$  cm e peso  $82 \pm 4$  kg. Al momento della sperimentazione tutti i soggetti godevano di ottima salute ed i consueti esami muscolo-scheletrici preliminari non hanno evidenziato alcuna

controindicazione clinica allo studio.

Dopo un periodo di riscaldamento di cinque minuti, ad ogni soggetto è stato chiesto di correre alla velocità desiderata lungo un percorso rettilineo di 12 m, alternando il modello di calzatura indossato. Per ogni calzatura tale prova è stata reiterata fino all'ottenimento di tre ripetizioni utili, avendo definito come “utile” un'esecuzione in cui il piede destro dei soggetti impattasse completamente su almeno una delle tre piattaforme dinamometriche (AMTI OR-6, Watertown, MA, USA) disposte in sequenza lungo il percorso.

Durante l'esecuzione delle prove un sistema optoelettronico ad otto telecamere per l'analisi del movimento (Motion Analysis Corporation, Santa Rosa, CA, USA) ha permesso di acquisire la cinematica degli arti inferiori dei soggetti. Dalle traiettorie dei *marker*, campionate ad una frequenza di 120 Hz e filtrate con un filtro Butterworth del secondo ordine con  $f_{\text{CUT-OFF}} = 12$  Hz, sono stati identificati gli angoli di flessione al ginocchio e dorsi-flessione alla caviglia nell'istante di impatto col terreno. La variabilità non significativa di questi parametri cinematici e della velocità di marcia ( $3.23 \pm 0.02$  ms<sup>-1</sup>) nella popolazione di riferimento ha consentito agli autori di attribuire alle sole calzature ogni variazione nello smorzamento della GRF.

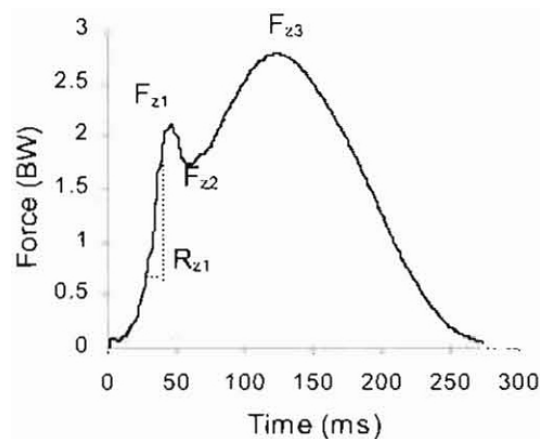


Figura 3: la componente verticale della forza di reazione vincolare misurata per uno dei soggetti partecipanti allo studio.

Ai dati di cinetica, campionati a 1000 Hz, non è stato applicato alcun filtraggio per preservare contributi ad alta frequenza; per ogni ripetizione utile, la componente verticale della GRF (Figura 3) è stata analizzata per estrarre i seguenti parametri:

- $F_{Z1}$ , primo picco di forza entro 50 ms dal contatto iniziale col terreno;
- $R_{Z1}$ , gradiente di carico per arrivare a  $F_{Z1}$ ;
- $F_{Z2}$ , minimo nella reazione vincolare successivo a  $F_{Z1}$ ;
- $F_{Z3}$ , picco di forza propulsiva.

Queste grandezze, normalizzate sul peso corporeo dei singoli soggetti e successivamente mediate sull'intera popolazione, sono stati organizzate come segue (Tabella 2).

Calzatura	$F_{Z1}$ [BW]	$R_{Z1}$ [BWs <sup>-1</sup> ]	$F_{Z2}$ [BW]	$F_{Z3}$ [BW]
Modello A	1.94 ( $\pm$ 0.18) <sup>#</sup>	57.9 ( $\pm$ 12.1) <sup>°</sup>	1.75 ( $\pm$ 0.15)	2.53 ( $\pm$ 0.39)
Modello B	1.84 ( $\pm$ 0.24) <sup>#</sup>	45.7 ( $\pm$ 11.6) <sup>°</sup>	1.67 ( $\pm$ 0.34)	2.55 ( $\pm$ 0.32)
Modello C	1.87 ( $\pm$ 0.24)	58.4 ( $\pm$ 21.3)	1.74 ( $\pm$ 0.35)	2.51 ( $\pm$ 0.37)

Tabella 2: media ( $\pm$  deviazione standard) dei parametri di GRF durante l'esecuzione dei *trial* suddivisi in funzione del modello di calzatura. I dati sono stati normalizzati sul peso dei soggetti al fine di consentire il confronto interindividuale; i valori medi tengono conto delle grandezze estratte per nove dei 10 soggetti analizzati: durante la sperimentazione un soggetto ha mostrato una costante tendenza ad appoggiare il terreno con la regione del mesopiede, pertanto le acquisizioni contestuali sono state trascurate. Gli apici denotano una differenza statisticamente significativa (<sup>#</sup>  $\rightarrow$   $p < 0.02$ ; <sup>°</sup>  $\rightarrow$   $p < 0.005$ ) tra i modelli.

I risultati hanno evidenziato una sostanziale ininfluenza dei diversi modelli di calzature studiati sui valori di  $F_{Z2}$  ed  $F_{Z3}$ . In aggiunta, i parametri cinetici ritrovati per il Modello C non sono statisticamente differenti da quelli rinvenuti per i modelli A e B; il Modello B tuttavia mostra intensità di primo picco ( $F_{Z1}$ ) e gradiente di carico ( $R_{Z1}$ ) significativamente inferiori rispetto al Modello A, classificandosi come migliore rispetto a quest'ultima in relazione all'assorbimento dei carichi.

Questo esito porta alla conclusione che calzature sportive caratterizzate da soluzioni

costruttive molto simili per lo smorzamento dei carichi (modelli A e B) possono esibire comportamenti sufficientemente distinti in virtù di dettagli esclusivi.

Flores e Smith (2004) hanno affrontato uno studio comparativo delle proprietà di smorzamento dinamico (*cushioning effect*) espresse da quattro differenti modelli di calzatura, ciascuno dei quali caratterizzato da specifici inserti nella regione del retro suola. Ai fini dell'indagine, gli autori si sono avvalsi di un simulatore di impatti (Figura 4) equipaggiato con un piede protesico su cui sono stati calzati i diversi modelli di calzature.

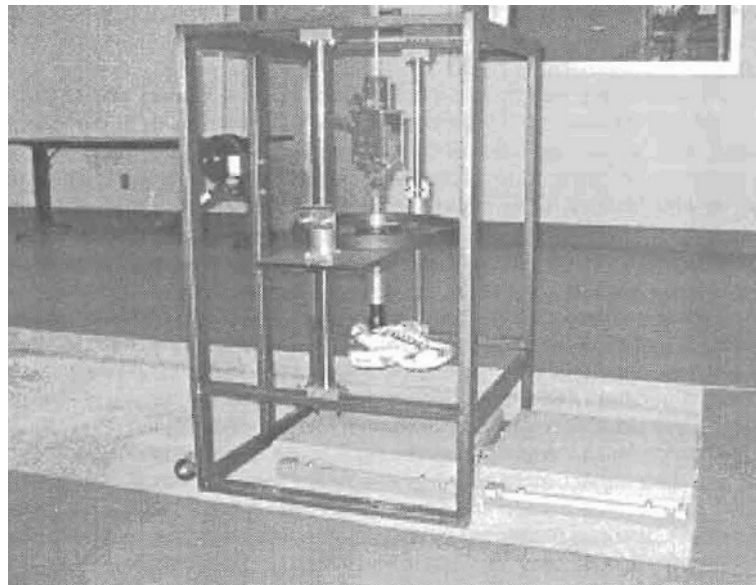


Figura 4: la struttura di simulazione di impatti (*shoe-drop model*) utilizzata dagli autori nella loro indagine comparativa.

Il complesso piede – calzatura è stato portato ad una quota di 76.2 mm rispetto alla superficie d'impatto: l'innesco degli eventi di caduta tramite rilascio di un blocco meccanico ha assicurato la ripetibilità degli stessi mentre le forze scambiate al terreno sono state acquisite mediante piattaforma dinamometrica (AMTI, Inc., Watertown, MA, USA).

Per ogni calzatura sono state effettuate 10 ripetizioni su cui sono stati calcolati i valori medi del picco di forza e del tempo utile al raggiungimento di tale picco (Tabella 3),

parametri assunti come indici descrittivi delle proprietà di assorbimento dinamico per le calzature: minori intensità per la forza e tempi maggiori per raggiungerne il valore di picco identificano, secondo gli autori, superiori capacità di *shock absorption*.

Calzatura	F <sub>MAX</sub> [N]	t <sub>FMAX</sub> [ms]
Modello A	1592.04 (± 227.8)	2.28 (± 0.18)
Modello B	1687.72 (± 216.6)	2.35 (± 0.15)
Modello C	1915.99 (± 25.9) <sup>A,B</sup>	1.95 (± 0.11) <sup>A,B</sup>
Modello D	2089.44 (± 279.5) <sup>A,B</sup>	1.70 (± 0.11) <sup>A,B,C</sup>

Tabella 3: media (± deviazione standard) calcolata sui 10 *trial* eseguiti per ogni modello di calzatura. Gli apici denotano una differenza statisticamente significativa ( $p < 0.05$ ) tra i modelli.

I risultati hanno evidenziato significative differenze tra i modelli di calzatura indagati: nello specifico, i modelli A (realizzato con materiali complianti ed inserti fluidi) e B (caratterizzato da un sistema a molle di nuova concezione) hanno dimostrato capacità di *shock absorption* sensibilmente superiori rispetto ai modelli C e D, nonostante anche questi ultimi implementassero analoghe strategie per l'attenuazione dei carichi.

Logan et al. (2010) sono autori di un recente studio per la differenziazione funzionale tra semplici calzature sportive e modelli specificamente progettati per l'attività atletica agonistica, indagando a questo scopo le manifestazioni cinetiche legate al loro utilizzo durante la corsa.

Nello specifico, l'équipe di Logan ha analizzato le reazioni vincolari al terreno per:

- un paio di comuni calzature da *running* (Modello A) caratterizzate da una suola relativamente compliant e un presunto controllo motorio neutro. Questo modello è stato progettato per garantire adeguato smorzamento dinamico e sufficiente comfort nella corsa;
- un paio di superleggere (*racing flats*, Modello B) dalla suola più rigida e sottile. Questa tipologia di calzature paga il prezzo di un *cushioning* ridotto in favore di un peso contenuto ed un miglior trasferimento di potenza tra piede e terreno, qualità



che contribuiscono ad una maggiore efficienza energetica nell'esercizio. In funzione delle loro caratteristiche queste scarpe sono indicate per discipline atletiche di lunga distanza, ma hanno una longevità limitata;

- un paio di calzature chiodate da pista (*distance spikes*, Modello C) con una suola in plastica rigida. Un sottile strato intermedio in EVA ricopre il ruolo di inserto ammortizzante nella regione del tallone. Il dettaglio costruttivo dei chiodi limita l'impiego di dette calzature alle superfici tipiche delle piste di atletica leggera, ma permette di massimizzare la trazione durante l'attività sportiva.

Gli autori hanno reclutato 20 corridori di cui 10 maschi ( $21.6 \pm 3.0$  anni;  $178 \pm 5$  cm;  $66.3 \pm 6.0$  kg) e 10 femmine ( $20.0 \pm 1.5$  anni;  $169 \pm 6$  cm;  $57.6 \pm 4.8$  kg), membri di squadre agonistiche di atletica leggera. Sono stati ammessi allo studio solo atleti *heel striker* esenti da infortuni per un periodo di almeno due mesi ed impegnati in allenamento specifico per la corsa da almeno tre settimane.

Dopo una consueta sessione di riscaldamento muscolare, ciascun atleta ha corso sulla pista *indoor* (Mondo SuperX, Mondo S.p.A., Alba, IT) per una distanza di almeno 30 m indossando i tre modelli di calzatura. Sulla traiettoria dei soggetti ed in una posizione non nota a questi, è stata collocata una piattaforma dinamometrica (Kistler 9287BA, Amherst, New York, USA) per la rilevazione della cinetica. La distanza tra piattaforma di forza e blocchi di partenza è stata dimensionata in modo da garantire l'impatto sullo strumento di misura a velocità prestabilita e costante ( $6.7 \text{ ms}^{-1}$  per i maschi;  $5.7 \text{ ms}^{-1}$  per le femmine), controllata in corrispondenza della piattaforma tramite un sistema di fotocellule.

Per ogni calzatura sono state collezionate due ripetizioni che verificassero le velocità sopra riportate con uno scarto massimo di  $\pm 2\%$ : in conseguenza dell'elevato numero di tentativi necessari per ottenere ripetizioni valide, il protocollo ha previsto periodi di recupero di 60 s tra le realizzazioni per escludere ragionevolmente l'influenza del fattore fatica.

I tracciati di GRF, campionati a 2 kHz e filtrati con un passa basso Butterworth ( $f_{\text{CUT-OFF}} = 50 \text{ Hz}$ ), sono stati analizzati per estrarre svariati parametri, tra cui:

- $F_{\text{ZIMP}}$ , massimo valore per la componente verticale della forza di impatto iniziale;
- $R_Z$ , gradiente di carico utile per passare dal 20% all'80% del peso corporeo;
- $t_{\text{STANCE}}$ , tempo complessivo di appoggio definito come la finestra temporale in cui la componente verticale della forza di reazione è superiore a 20 N;
- $F_{\text{ZMAX}}$ , picco massimo per la componente verticale della GRF.

I valori sono stati normalizzati sul peso corporeo dei soggetti e successivamente mediati sulla popolazione mantenendo la distinzione tra i generi (Tabella 4).

Genere	Calzatura	$F_{\text{ZIMP}}$ [BW]	$R_Z$ [BW $s^{-1}$ ]	$t_{\text{STANCE}}$ [s]	$F_{\text{ZMAX}}$ [BW]
♀	Modello A	2.47 ( $\pm 0.37$ )	148 ( $\pm 54$ )	0.167 ( $\pm 0.009$ ) <sup>B</sup>	2.95 ( $\pm 0.23$ )
	Modello B	2.54 ( $\pm 0.37$ )	175 ( $\pm 108$ )	0.160 ( $\pm 0.008$ ) <sup>A</sup>	2.97 ( $\pm 0.29$ )
	Modello C	2.77 ( $\pm 0.45$ )	191 ( $\pm 136$ )	0.161 ( $\pm 0.008$ )	3.09 ( $\pm 0.46$ )
♂	Modello A	2.36 ( $\pm 0.55$ ) <sup>B,C</sup>	151 ( $\pm 47$ ) <sup>B,C</sup>	0.157 ( $\pm 0.013$ )	3.16 ( $\pm 0.24$ )
	Modello B	2.96 ( $\pm 0.67$ ) <sup>A</sup>	247 ( $\pm 73$ ) <sup>A</sup>	0.153 ( $\pm 0.011$ )	3.46 ( $\pm 0.49$ )
	Modello C	3.06 ( $\pm 0.48$ ) <sup>A</sup>	232 ( $\pm 117$ ) <sup>A</sup>	0.151 ( $\pm 0.012$ )	3.44 ( $\pm 0.44$ )

Tabella 4: media ( $\pm$  deviazione standard) dei parametri calcolati sui 120 *trial* totali, suddivisi per genere dei soggetti e modelli di calzatura. Gli apici denotano una differenza statisticamente significativa ( $p < 0.05$ ) tra i modelli.

Per le femmine l'unica variazione significativa è stata ritrovata nella durata dell'appoggio che diminuisce passando dal Modello A al Modello B. Questo risultato è coerente con le maggiori reazioni vincolari misurate per *racing flats* e *distance spikes*: ad una riduzione del tempo utile di appoggio deve necessariamente corrispondere un aumento delle forze al terreno per mantenere costante una data velocità di corsa.

I risultati relativi ai corridori maschi hanno confermato le aspettative iniziali circa l'utilizzo di calzature agonistiche. I modelli B e C, a causa di uno spessore di suola inferiore, mostrano valori sensibilmente maggiori per  $F_{\text{ZIMP}}$  ed  $R_Z$  rispetto alla canonica calzatura da

*running*; la funzionalità di *shock absorption* è conseguentemente ridimensionata.

I risultati di questo studio forniscono la prova scientifica di come ogni attività sportiva richieda un tipo di calzatura appropriato: mentre in un contesto agonistico l'atleta è principalmente interessato alla performance e pertanto disposto a rinunciare ad un *cushioning* elevato, durante l'attività amatoriale privilegerà calzature in grado di massimizzare il comfort.

La selezione di studi presentata si focalizza sulla valutazione funzionale di calzature sportive in regime di utilizzo oppure tramite simulazione in laboratorio dell'interazione piede – calzatura: l'approccio è diretto e pragmatico ma, come evidenziato in precedenza (vedi Paragrafo 1.2, “Metodi di indagine classica”), le grandezze ottenibili sono limitate e riferite alla calzatura nella sua globalità.

Indagini più dettagliate sono possibili a patto di abbracciare un approccio di analisi differente.

Oltre a fornire una panoramica sui metodi classici impiegati per l'analisi delle calzature, la letteratura riportata ha contribuito con spunti ed indicazioni utili allo sviluppo della metodologia qui proposta, tra cui:

- la configurazione dei sistemi meccanici di simulazione d'impatto;
- le specifiche di campionamento e filtraggio per le grandezze acquisite;
- le intensità tipiche per la componente verticale della GRF.

### **Studi computazionali.**

In aggiunta alle indagini sperimentali appena descritte, nel corso degli ultimi 15 anni il sistema uomo – calzatura è stato esplorato anche grazie all'implementazione di modelli computazionali (Cheung et al., 2009) basati sulla tecnica degli elementi finiti (*finite element*, FE), ognuno dei quali focalizzato sull'estrazione di specifiche grandezze di interesse e caratterizzato da proprie ipotesi semplificative e limitazioni.

In aggiunta alla maturazione di una solida esperienza nella modellazione del sistema, questa nuova frontiera di analisi ha prodotto risultati concreti, quantificando variabili altrimenti inaccessibili come sforzi e deformazioni a carico di strutture e tessuti coinvolti. L'indagine di questi aspetti costituisce una base informativa di grande valore biomeccanico ed industriale per lo sviluppo di calzature innovative in grado di ottimizzare il compromesso tra comfort, prestazioni e protezione.

Sebbene tecniche di analisi basate su simulazioni FE siano usate estensivamente in numerosi campi dell'ingegneria, le pubblicazioni focalizzate sull'indagine di calzature sportive non sono particolarmente numerose, probabilmente per questioni di segretezza industriale.

Di seguito vengono sinteticamente riportati gli approfondimenti più significativi rinvenuti in letteratura.

Lemmon et al. (1997) hanno realizzato una simulazione quasi statica della fase di propulsione (*push off*) nel cammino per indagare la pressione in corrispondenza delle teste metatarsali e prevedere le variazioni di tale parametro in funzione di differenti spessori di soletta interna (*insole*) e tessuto molle interposti.

Nel modello geometrico 2D adottato (Figura 5) l'interfaccia piede – calzatura è stata rappresentata tramite una sezione sagittale delle stesse strutture passante per la seconda testa metatarsale. La geometria della calzatura è stata suddivisa in modo da poter caratterizzare distintamente soletta interna e suola (*midsole*).

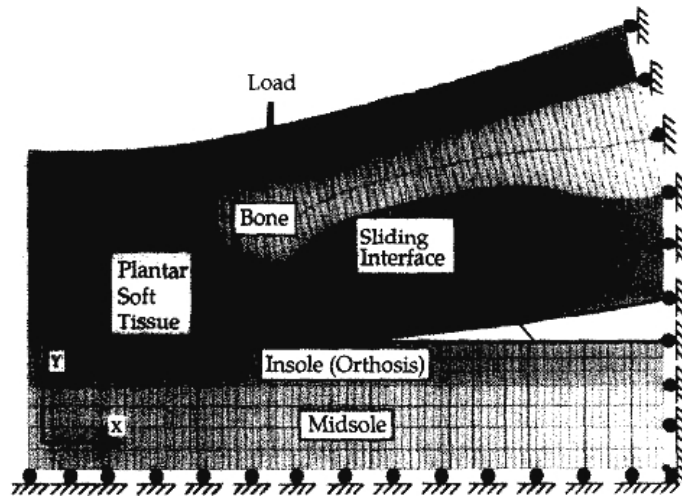


Figura 5: il modello geometrico 2D di Lemmon et al. (1997), comprensivo di strutture ossee e tessuti molli plantari. La lunghezza complessiva del modello è di 90 mm, mentre la cella di calcolo media copre una superficie di 3.7 mm<sup>2</sup>.

La risposta meccanica delle schiume elastomeriche di *insole* (in PPT, Langer Biomechanics Group, Deer Park, NY, USA) e *midsole* (in Cloud Crepe, Sole-Tech, Salem, MA, USA) è stata modellata tramite una funzione polinomiale di energia di deformazione (*strain energy function*, SEF) del terzo ordine (Tabella 5):

$$U = \sum_{i=1}^3 \frac{2\mu_i}{\alpha_i} \left[ (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) + \frac{1}{\beta_i} (J_{el}^{-\alpha_i \beta_i} - 1) \right] .$$

Materiale	i	$\mu_i$ [kPa]	$\alpha_i$	$\beta_i$
<i>Insole</i> : PPT	1	465.000	1.963	0.20
	2	703.300	3.941	0.20
	3	-11.370	-1.970	0.20
<i>Midsole</i> : Cloud Crepe	1	-985.400	2.440	0.20
	2	1474.000	4.544	0.20
	3	-10.230	-2.966	0.20

Tabella 5: valori dei coefficienti usati per la modellazione numerica della risposta meccanica di

PPT e Cloud Crepe.

Lo spessore della *midsole* è stato dimensionato con un valore costante (12.7 mm), mentre sono state ipotizzate sei differenti solette interne, ognuna delle quali caratterizzata da uno specifico spessore (0.0, 1.6, 3.2, 6.4, 9.5 e 12.7 mm).

Il tessuto osseo è stato caratterizzato come materiale elastico lineare ( $E = 10$  GPa;  $\nu = 0.34$ ) mentre le proprietà meccaniche dei tessuti molli sono state modellate tramite una *strain energy function* elastica non lineare di secondo ordine:

$$U = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i} .$$

Il tessuto molle plantare in corrispondenza della testa metatarsale è stato parametrizzato con due spessori differenti, in modo da accostare alla casistica di soggetto sano (spessore tessuto = 12 mm) anche una condizione tipica di soggetti affetti da piede neuropatico (spessore tessuto = 3 mm).

L'intensità di carico verticale applicata nei due scenari è stata valutata tramite misure di pressione nell'istante di *push off* per due soggetti rappresentativi degli stati fisiologico (90 N) ed alterato (129 N); eventuali carichi di taglio sono stati trascurati in virtù di maggiore semplicità in modellazione, mentre all'interfaccia piede – *insole* è stato assegnato un coefficiente di attrito pari a 0.5.

In tabella sono riportate le previsioni numeriche dei picchi pressori per tutti i 12 casi ottenuti dalla combinazione delle parametrizzazioni (Tabella 6).

<i>Insole</i> [mm]	$P_{MAX}$ [kPa]			
	Tessuto fisiologico		Tessuto a spessore ridotto	
	FEA	Sperimentale	FEA	Sperimentale
0.0	152.7	171.9	274.8	278.3
1.6	139.9	151.0	257.4	282.5
3.2	134.9	143.8	242.8	255.0
6.4	128.1	138.0	220.2	253.6
9.5	123.0	123.7	204.4	222.5
12.7	119.9	120.0	193.7	210.0

Tabella 6: previsioni numeriche e misure sperimentali del picco di pressione plantare all'interfaccia piede – *insole* nelle condizioni di tessuto fisiologico e tessuto patologico a spessore ridotto.

I valori confermano l'ipotesi intuitiva che a solette interne di spessore maggiore corrisponda un'attenuazione dei carichi più marcata; inoltre la riduzione del picco pressorio per un dato incremento di spessore di *insole* è più incisiva nel caso patologico di tessuto molle a spessore ridotto.

Gli autori hanno cercato di validare i risultati numerici tramite misure sperimentali di pressione plantare durante il cammino (Tabella 6) usando specifiche solette di pressione (Novel Electronics, Inc., Minneapolis, MN, USA) per ogni condizione precedentemente simulata al calcolatore.

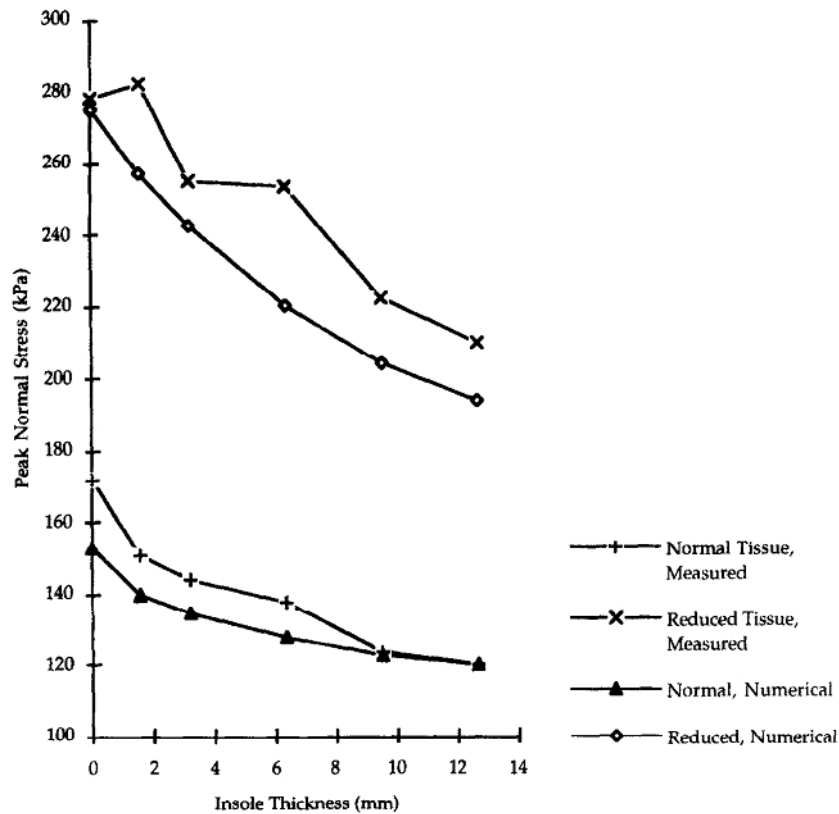


Figura 6: picchi di pressione plantare in funzione dello spessore di soletta interna. Gli andamenti rappresentati permettono il confronto tra i risultati previsti tramite modellazione numerica e quelli misurati con solette di pressione, in entrambi gli scenari fisiopatologici.

Il confronto tra le serie di dati ha rivelato differenze massime dell'ordine del 15% in tutti i 12 casi considerati; è stata inoltre riscontrata una buona compatibilità tra gli andamenti previsti e misurati del picco pressorio in funzione dello spessore di soletta interna (Figura 6).

Verdejo e Mills (2004) hanno portato a termine un'analisi FE sull'indentazione meccanica della *midsole* di una generica calzatura sportiva da parte della regione calcaneare del piede per la previsione numerica degli sforzi interni al tallone.

Le informazioni ottenute dal modello numerico sono state ulteriormente arricchite con uno studio longitudinale sui meccanismi di degradazione per fatica delle potenzialità di *shock absorption* attribuite alle schiume polimeriche.



Ai fini della semplificazione geometrica per il tallone è stato adottato un modello 2D integrato da condizioni di simmetria assiale (Figura 7); la stessa strategia modellistica è stata utilizzata per il volume rappresentativo della porzione di suola sottostante ( $r = 35$  mm;  $h = 22$  mm).

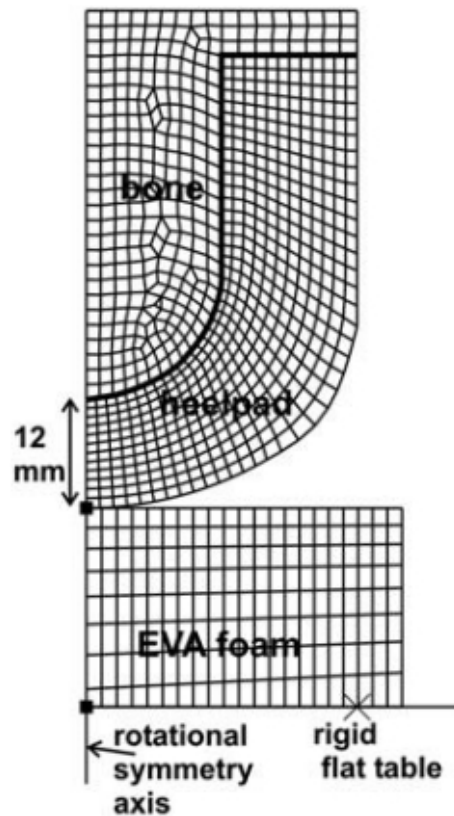


Figura 7: il modello geometrico di Verdejo e Mills (2004) utilizza condizioni di simmetria assiale per ridurre la complessità tipica di una formulazione completamente 3D. La griglia di calcolo applicata per la discretizzazione del modello è rappresentata in configurazione indeformata.

Non essendo stata fornita alcuna modellazione per la tomaia, al tallone sono concesse libere espansioni ai lati.

Per la caratterizzazione del volume di tessuto molle, gli autori hanno adottato una funzione di energia di deformazione del secondo ordine appartenente alla famiglia dei modelli iperelastici:

$$U = \sum_{i=1}^2 \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left[ (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) + \frac{1}{D_i} (J-1)^{2i} \right] .$$

La risposta meccanica della schiuma di EVA ( $\rho = 150 - 200 \text{ kgm}^{-3}$ ) è stata modellata con una *strain energy function* di Ogden del secondo ordine:

$$U = \sum_{i=1}^2 \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left[ (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) + \frac{1}{\beta_i} (J^{-\alpha_i \beta_i} - 1) \right] .$$

In tabella vengono riportati i coefficienti usati nell'identificazione dei legami costitutivi per i materiali citati (Tabella 7).

Tessuto/Materiale	i	$\mu_i$ [kPa]	$\alpha_i$	$\nu_i$
Tessuti molli	1	50	30	–
	2	50	-4	–
EVA	1	1000	10	0
	2	50	-4	0.4

Tabella 7: valori dei coefficienti per la modellazione numerica di EVA e tessuti molli. I parametri relativi al tessuto molle del tallone sono stati identificati tramite interpolazione ottimale di tracciati forza/spostamento prelevati da letteratura specializzata; i coefficienti per l'EVA sono stati quantificati in seguito a misure sperimentali in test di compressione e trazione monoassiali su campioni rappresentativi del materiale.

Al volume rappresentativo dell'osso è stato impartito uno spostamento a rampa di intensità 20 mm in direzione verticale, mentre la superficie rigida di appoggio è stata vincolata per tutta la durata della simulazione.

All'interazione tallone – *midsole* è stato assegnato un coefficiente di attrito pari a 1.0.

I risultati, validati attraverso misure sperimentali di pressione all'interfaccia piede – calzatura durante corsa su tappeto (Quinton Instrument Co. 640, Bothell, WA, USA) a

velocità preimpostata ( $v_{\text{TAPPETO}} = 2.61 \text{ ms}^{-1}$ ), hanno permesso di verificare che la distribuzione spaziale dei picchi pressori misurati al tallone è parzialmente compatibile con la semplificazione di simmetria assiale adottata nel modello. I valori numerici previsti sono comunque superiori rispetto alle misurazioni effettuate: mentre i risultati di simulazione suggeriscono uno sforzo massimo di 700 kPa all'interfaccia tallone – *midsole* (Figura 8), le misure sperimentali riportano un valore pari a 300 kPa.

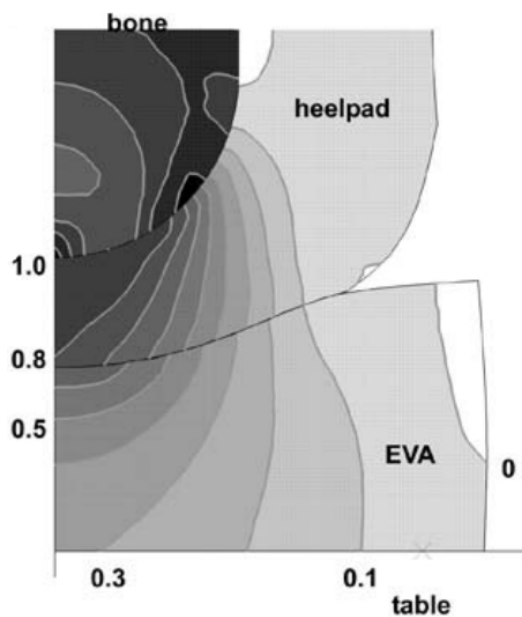


Figura 8: sforzo di compressione [MPa] in direzione verticale per un affondamento di 10.2 mm, corrispondente ad un carico nodale pari a 502 kN.

L'indagine al microscopio a scansione elettronica (*scanning electron microscopy*, SEM) delle *midsole* calzate dai soggetti reclutati ai fini della validazione sperimentale (3 soggetti;  $40.0 \pm 7.9$  anni;  $78.3 \pm 14.8$  kg; *heel striker*) ha inoltre rivelato danni strutturali cospicui per distanze percorse di almeno 750 km. La fatica meccanica accumulata dalla schiuma polimerica influenza l'efficacia di *shock absorption* e pertanto rappresenta una potenziale causa di infortuni durante la corsa.

Goske et al. (2006) hanno indagato la distribuzione della pressione plantare simulando l'*heel strike* in regime quasi statico tramite modelli FE 2D dell'interfaccia tra piede e calzatura, cercando di identificare i principali fattori nel design di solette interne in grado di ridurre il picco pressorio calcaneare durante il cammino.

A questo scopo, l'équipe di Goske ha concepito una casistica comprendente 27 alternative di *insole* design, ottenute combinando tre differenti fattori (grado di congruenza col tallone in assenza di carico, spessore e materiale) per ciascuno dei quali sono state ammesse tre possibili parametrizzazioni (Figura 9).

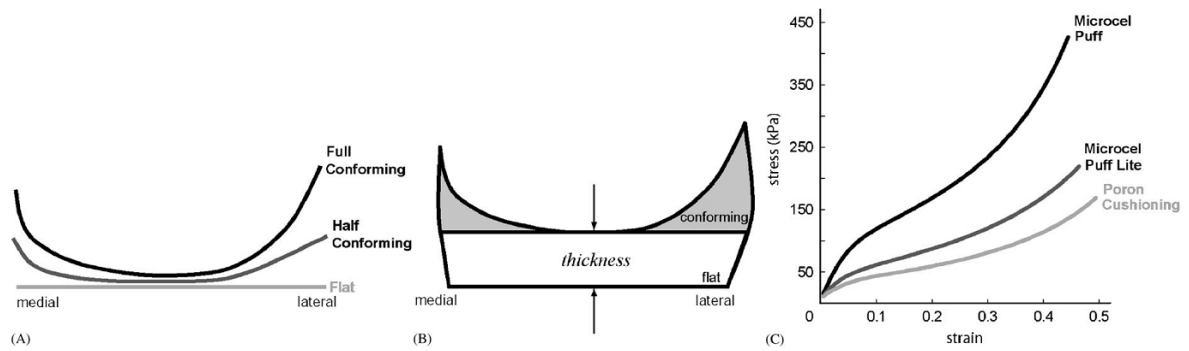


Figura 9: i tre fattori che definiscono i 27 design di *insole* oggetto dello studio e relative parametrizzazioni. Per il grado di congruenza (A) sono ammessi profili a conformità incrementale mentre lo spessore (B) è stato quantificato in 6.3, 9.5 e 12.7 mm. Le curve sforzo/deformazione associate ai materiali contemplati (C) ne mettono in luce le caratteristiche distintive a livello di risposta meccanica.

Il modello geometrico del tallone (Figura 10) è stato realizzato a partire da una sezione coronale conveniente della corrispondente struttura anatomica, ottenuta da immagini di risonanza magnetica (*magnetic resonance imaging*, MRI): la porzione associata al tessuto osseo è stata modellata come un corpo rigido mentre per il tessuto molle circostante è stata adottata una *strain energy function* iperelastica di primo ordine:

$$U = \frac{2\mu}{\alpha^2} (\lambda_1^\alpha + \lambda_2^\alpha + \lambda_3^\alpha - 3) \quad .$$

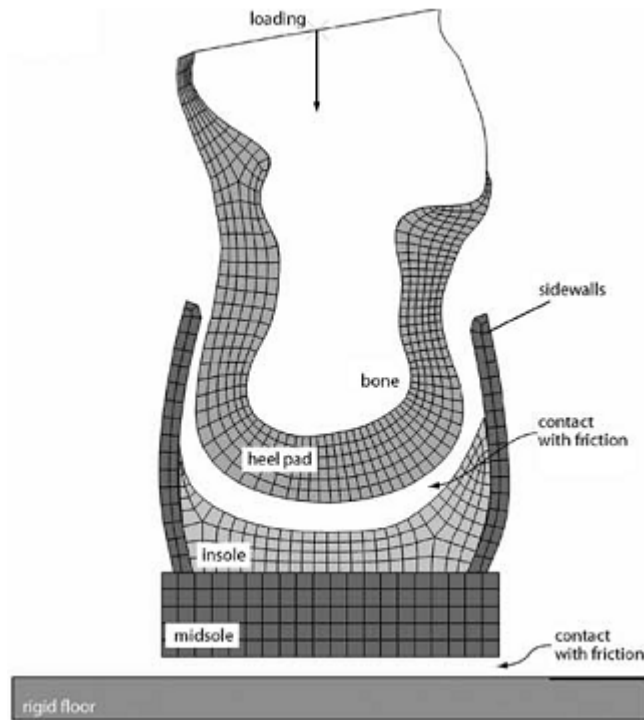


Figura 10: modello geometrico 2D implementato nello studio di Goske et al. (2006) per indagare l'efficacia di differenti solette interne nello smorzamento delle pressioni a livello calcaneare. Il modello è in grado di descrivere in modo potenzialmente accurato gli sforzi e le deformazioni limitatamente alla sezione del complesso piede – calzatura considerata, ma non può fornire una descrizione completa della fenomenologia di impatto.

Allo stesso modo, per la calzatura è stato costruito un modello 2D in una sezione coerente con quella anatomica di interazione: l'azione confinante della tomaia è stata replicata tramite due pareti laterali modellate elasticamente con le proprietà del cuoio mentre la *midsole* è stata dimensionata con uno spessore di 20 mm e caratterizzata in qualità di iperschiuma tramite un modello elastico non lineare:

$$U = \frac{2\mu}{\alpha^2} \left[ (\lambda_1^\alpha + \lambda_2^\alpha + \lambda_3^\alpha - 3) + \frac{1}{\beta} ((J^{el})^{-\alpha\beta} - 1) \right] .$$

In tabella vengono riportati i valori numerici assunti dai coefficienti per l'identificazione univoca dei legami costitutivi dei materiali considerati (Tabella 8).

Tessuto/Materiale	$\mu$ [kPa]	$\alpha$	$\nu$	E [kPa]
Tessuti molli	16.45	6.82	–	–
<i>Insole</i>				
Microcell Puff	1340	28.14	0.054	–
Microcell Puff Lite	1220	48.29	0.028	–
Poron Cushioning	620	34.46	0.037	–
<i>Midsole</i>	4240	28.59	0.076	–
Cuoio	–	–	0.3	20

Tabella 8: valori assunti dai coefficienti per la modellazione numerica dei materiali coinvolti.

Le interazioni tallone – *insole* e *midsole* – suolo sono state implementate numericamente tramite algoritmo *penalty*, con coefficiente di attrito pari a 0.5.

I risultati (Tabella 9), validati a mezzo di un confronto tra i picchi pressori misurati sperimentalmente e le stesse grandezze restituite dal codice di calcolo, hanno mostrato come il grado di congruenza geometrica tra tallone e *insole* costituisca il fattore più incisivo per la riduzione degli sforzi all'interfaccia.

Grado di congruenza	Materiale	Spessore		
		6.3 mm	9.5 mm	12.7 mm
<i>Flat</i>	Microcell Puff	15.2%	20.5%	23.0%
	Microcell Puff Lite	16.3%	20.7%	23.9%
	Poron Cushioning	16.8%	20.7%	24.1%
<i>Half conforming</i>	Microcell Puff	26.7%	28.7%	31.3%
	Microcell Puff Lite	26.2%	29.7%	34.7%
	Poron Cushioning	25.1%	28.5%	33.8%
<i>Full conforming</i>	Microcell Puff	37.5%	38.9%	40.7%
	Microcell Puff Lite	37.9%	40.7%	43.7%
	Poron Cushioning	35.6%	38.9%	43.4%

Tabella 9: riduzione percentuale del picco pressorio calcaneare nelle 27 casistiche contemplate

dallo studio. I valori delle riduzioni si riferiscono alla pressione calcaneare prevista per l'interazione tallone – suolo senza ulteriori elementi interposti (condizione *barefoot*).

Allo stesso modo è stato possibile ridimensionare l'importanza attribuita all'utilizzo di materiali differenti.

Diversamente dagli altri autori, Cheung e Zhang (2005) hanno puntato sull'accuratezza anatomica ricostruendo l'intero piede umano in un modello FE 3D sulla base di immagini coronali MRI spaziate di 2 mm. Tramite simulazione statica dei carichi tipici di un'ortostasi perfettamente bilanciata, gli autori hanno valutato l'efficacia di diverse solette interne nel contenimento delle pressioni plantari e nella redistribuzione degli sforzi a carico di ossa e legamenti.

Per una modellazione rappresentativa della struttura scheletrica del piede (Figura 11.B) sono state definite le geometrie di 28 segmenti ossei e le inserzioni di 72 legamenti; il contatto tra le superfici articolari è stato caratterizzato con coefficiente di attrito nullo, un semplice espediente numerico per interpretare la funzionalità in vivo della cartilagine articolare. La struttura ossea è stata quindi combinata con il volume dei tessuti molli (Figura 11.A).

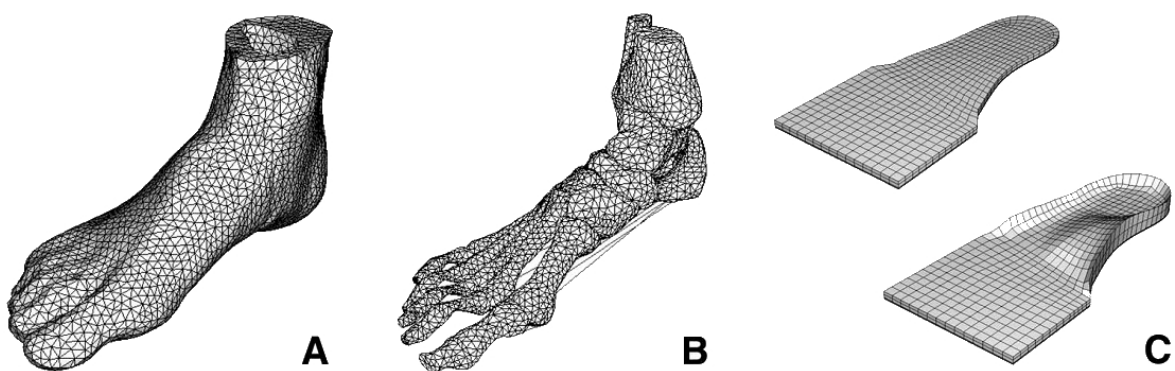


Figura 11: il modello proposto da Cheung e Zhang (2005) si distingue per l'accuratezza riposta nella modellazione delle strutture anatomiche di interesse, comprensiva di tessuti molli esterni (A), ossa e legamenti (B). Le due geometrie di *insole* indagate nello studio (C) presentano morfologie

marcatamente differenti.

Nella simulazione della postura ortostatica è stata prevista l'interazione con due supporti plantari di morfologie differenti (Figura 11.C): la prima *insole* è stata disegnata con uno spessore uniforme di 5 mm mentre la geometria della seconda, più conforme al piede, è stata ottenuta tramite calco virtuale della superficie plantare del piede stesso.

Entrambi i supporti plantari sono stati ulteriormente caratterizzati tramite l'assegnazione di tre materiali alternativi:

- schiuma in poliuretano (PU) a celle aperte;
- EVA ad alta densità;
- polipropilene (PP).

In questo modo è stato possibile valutare anche l'influenza del materiale sulle grandezze di interesse. Uno spessore rigido è stato infine posizionato sotto la geometria di *insole* a simulare il piano di supporto.

Per tutti i tessuti biologici ed i materiali sintetici introdotti nel modello è stata proposta una caratterizzazione omogenea, isotropa ed elastica lineare (Tabella 10).

Tessuto/Materiale	E [MPa]	$\nu$
Osso	7300	0.30
Tessuti molli	0.15	0.45
Cartilagine	1.00	0.40
Legamenti	260	–
Fascia plantare	350	–
<i>Insole</i>		
Schiuma in PU	0.30	0.40
EVA ad alta densità	1.00	0.40
PP	1000	0.40

Tabella 10: parametri per la modellazione meccanica dei materiali utilizzati nel modello FE.



La misura sperimentale delle pressioni (Tekscan, Inc., Boston, MA, USA) all'interfaccia piede – *insole* per un soggetto campione (26 anni; 174 cm; 70 kg) in ortostasi, oltre a fornire i dati necessari alla validazione delle simulazioni numeriche, ha permesso di identificare la posizione del centro di pressione (*center of pressure*, COP).

Il COP è stato individuato anche nel modello numerico ed il carico (350 N) applicato in corrispondenza di esso; all'interfaccia piede – *insole* è stato assegnato un coefficiente di attrito pari a 0.6.

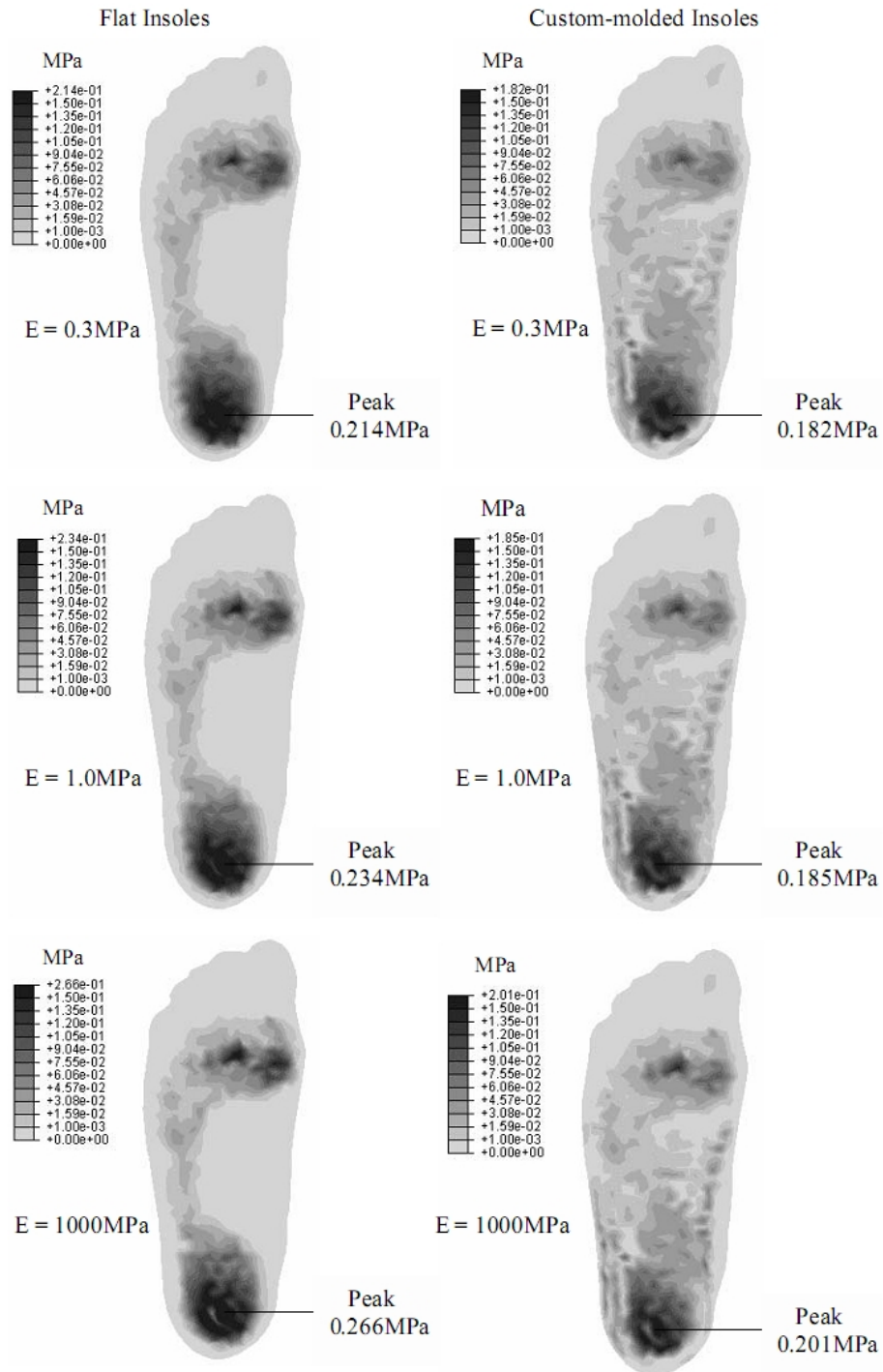


Figura 12: distribuzioni di pressione plantare previste dal codice numerico nei casi di *insole* piatta (*flat*) e conforme al piede (*custom-molded*) con materiali a rigidezza incrementale ( $E_{PU} = 0.3 \text{ MPa}$ ;  $E_{EVA} = 1.0 \text{ MPa}$ ;  $E_{PP} = 1.0 \text{ GPa}$ ).

Le previsioni computazionali hanno mostrato un significativo accordo con le distribuzioni

di pressione misurate, nonostante i picchi di pressione rilevati sperimentalmente fossero inferiori; gli autori hanno attribuito questa discordanza al divario in risoluzione spaziale tra modello FE e solette di pressione, ma potrebbe anche essere il risvolto di un'accuratezza limitata dei sensori di pressione utilizzati (Hsiao, 2002; Hurkmans et al., 2006).

Ad ogni modo i risultati numerici (Figura 12) testimoniano le maggiori capacità di attenuazione e redistribuzione delle pressioni all'interfaccia per solette *custom-molded*: a parità di materiale (polipropilene;  $E_{PP} = 1.0$  GPa), questo tipo di soletta è in grado di ridurre i picchi pressori del 23.2% e 24.4% in corrispondenza di teste metatarsali e tallone, rispettivamente.

Mantenendo invece costante il fattore geometrico (*insole* a spessore uniforme), per la soletta compliant (schiuma in poliuretano a celle aperte;  $E_{PU} = 0.3$  MPa) sono state previste attenuazioni del 16.5% (sotto le teste metatarsali) e 19.5% (in corrispondenza del tallone) rispetto a quella rigida in PP.

La combinazione di entrambi i parametri ha mostrato infine che, nel confronto tra soletta rigida (polipropilene;  $E_{PP} = 1.0$  GPa) a spessore uniforme e soletta compliant (schiuma in poliuretano a celle aperte;  $E_{PU} = 0.3$  MPa) a geometria *custom*, la riduzione delle sollecitazioni ad opera di quest'ultima è pari al 40.7% nella regione metatarsale ed al 31.6% sotto il tallone.

Come nel precedente studio di Goske et al. (2006), anche in questo caso i risultati confermano l'importanza preponderante del fattore di forma della *insole* sul tipo di materiale utilizzato per un'efficace riduzione delle pressioni all'interfaccia.

Gli studi riportati affrontano l'interazione tra piede e calzatura a mezzo di simulazioni computazionali. Tuttavia le semplificazioni dimensionali adottate o l'assunzione di regimi quasi statici, insensibili agli effetti inerziali, possono risultare incompatibili con le realtà simulate. In aggiunta, le procedure di validazione seguite si basano sul confronto spesso qualitativo tra previsioni numeriche di pressioni e corrispondenti misure sperimentali su

soggetti: a questo proposito è opportuno ricordare come i comuni sensori di pressione non godano né di elevate risoluzioni spaziotemporali né di comprovata affidabilità (Hsiao, 2002; Hurkmans et al., 2006).

La rosa di pubblicazioni analizzata, inoltre, mostra un evidente e prioritario interesse per le conseguenze a livello biomeccanico dell'interazione piede – calzatura piuttosto che per una valutazione meccanico-funzionale di quest'ultima.

Per questo motivo gli studi citati non costituiscono dei riferimenti diretti, bensì piuttosto una fonte di ispirazione in merito alle strategie utilizzate nella creazione dei modelli.

Nello specifico, dalla letteratura presentata sono state acquisite le seguenti informazioni:

- la tipica gamma di valori per i coefficienti di attrito assegnati alle interazioni piede – calzatura (da 0.5 a 1.0);
- le funzioni di energia di deformazione adottate nella modellazione dei materiali;
- l'importanza del fattore di congruenza geometrica tra piede e *insole*, in grado di influenzare in modo significativo i risultati;
- la generazione di modelli di *insole* ad alta conformità geometrica tramite calco virtuale della superficie plantare.

## 1.4 Obiettivi dello studio

Il presente studio si pone come obiettivo l'indagine di fattibilità circa una metodologia innovativa per l'analisi delle proprietà meccanico-funzionali di calzature sportive, basata sull'integrazione di:

- un sistema di simulazione di impatti (*impact simulator*, IS);
- acquisizioni ottiche ad alta risoluzione temporale;
- analisi computazionali basate sulla tecnica FE.

Queste tre possibilità di analisi potrebbero essere adottate anche singolarmente per strutturare un'indagine funzionale:

- il simulatore di impatti permetterebbe di studiare gli urti al terreno di una generica calzatura in condizioni di alta ripetibilità e controllo;
- l'analisi ottica consentirebbe una valutazione qualitativa ed esclusivamente esterna delle deformazioni a carico della calzatura all'impatto col terreno;
- l'indagine computazionale offrirebbe la possibilità di indagare le strutture di interesse anche internamente senza alcuna limitazione sulla tipologia di risultati estraibili ma, a compensare l'appetibilità dello strumento, richiederebbe una validazione dei risultati tramite grandezze sperimentali confrontabili.

L'uso simultaneo dei tre approcci consente proprio quest'ultima verifica: la deformazione superficiale a carico della *midsole*, calcolata a partire dalle acquisizioni ottiche degli impatti simulati, permette di impostare una validazione sperimentale dei risultati numerici rinvenuti tramite analisi computazionale (Figura 13).

L'indagine è stata intenzionalmente limitata agli impatti al suolo del sistema piede – calzatura riprodotti artificialmente mediante l'IS. Quest'ultimo è stato personalizzato in modo tale da emulare la configurazione articolare tibiotarsica all'*heel strike* di un soggetto medio durante la corsa (Figura 17).

Gli eventi di impatto sono stati acquisiti con una singola telecamera digitale ad alta risoluzione temporale (*high speed digital camera*, HS DC) per la detezione della collisione del tacco nel piano sagittale ed il successivo calcolo delle deformazioni superficiali.

Sia il set-up sperimentale che gli *script* utilizzati sono stati già predisposti per future integrazioni con ulteriori gruppi di acquisizione ottica nonché per l'estensione a casistiche in vivo.

Un esito positivo della validazione autorizzerebbe l'adozione stabile dello strumento computazionale per l'indagine approfondita delle proprietà di *shock absorption* di materiali impiegati dall'industria del settore. Questo favorirebbe anche la ricerca di combinazioni ottimali di materiali differenti e l'indagine sulla geometria da attribuire al prodotto finale, beneficiando di tutte le agevolazioni del metodo, tra cui:

- risoluzione temporale virtualmente infinita;
- estrapolazione di grandezze non direttamente misurabili;
- alto grado di automazione;
- facile implementazione di studi parametrici;
- vantaggi economici di lungo periodo in relazione al costo cumulato di valutazioni sperimentali con prototipi.

In sintesi, la metodologia esposta sarebbe in grado di fornire all'industria del settore un potente strumento predittivo per l'analisi dell'interazione tra uomo e calzatura in eventi significativamente impulsivi.

Mentre nel presente capitolo (vedi Capitolo 1, “Introduzione”) è stata fornita una breve introduzione allo studio insieme all'analisi dei più significativi esempi di letteratura contestuale, i capitoli successivi descrivono nel dettaglio il percorso intrapreso ai fini della validazione della metodologia.

Il Capitolo 2, dopo una dettagliata illustrazione delle relazioni tra i tasselli che compongono lo studio, presenta l'intero set-up sperimentale, le sessioni di acquisizione e le

modalità di analisi video per il calcolo della deformazione superficiale in corrispondenza del retro suola (vedi Capitolo 2, “Metodi e strumenti” – Parte sperimentale). Nella successiva parte del capitolo l'interesse è spostato sulle simulazioni computazionali, con la costruzione del modello geometrico, la modellazione di materiali, l'applicazione delle condizioni al contorno e lo studio di sensitività (vedi Capitolo 2, “Metodi e strumenti” – Parte computazionale).

Il Capitolo 3 raccoglie tutti i risultati utili al processo di validazione (vedi Capitolo 3, “Risultati”) mentre il capitolo conclusivo contiene riflessioni e spunti per future migliorie ed integrazioni (vedi Capitolo 4, “Conclusioni”).

# Capitolo 2

## METODI E STRUMENTI

Dopo una panoramica sull'intero studio, vengono approfonditi gli strumenti, i metodi e le procedure con cui sono state ottenute le grandezze fondamentali alla validazione dell'approccio.

Per comodità, il presente capitolo è stato suddiviso in due parti: la prima è relativa alla sperimentazione in laboratorio mentre la seconda si focalizza sulla simulazione numerica delle prove di impatto.



## 2.1 Panoramica dello studio

Le simulazioni sperimentali di impatto replicate artificialmente con l'IS sono state acquisite tramite HS DC: i video delle collisioni sono stati successivamente processati con uno *script* dedicato per il calcolo delle deformazioni superficiali a carico del retro suola, basato sull'identificazione e quantificazione del movimento relativo di *marker* ottici applicati alla calzatura. Questa deformazione ritrovata per via sperimentale è stata quindi utilizzata come termine di paragone nel confronto validativo con i corrispondenti risultati computazionali.

L'acquisizione delle forze scambiate al terreno nel corso degli stessi impatti ha permesso di impostare un ulteriore confronto di validazione tra grandezze cinetiche sperimentali e reazioni nodali numeriche. La detezione optoelettronica della traiettoria coperta dal braccio di leva dell'IS ha fornito la traccia cinematica con cui pilotare il modello computazionale nella reinterpretazione virtuale degli eventi di impatto.

In aggiunta, la combinazione dei dati di cinematica e cinetica ha permesso di identificare il parametro di massa efficace utile alla caratterizzazione delle collisioni. Sulla base di questo parametro è stata indagata la liceità di un confronto con studi di letteratura analoghi basati sul reclutamento di individui piuttosto che sull'utilizzo di strutture meccaniche sostitutive.

Una sintesi schematica di quanto ora esposto è rappresentata nella figura seguente (Figura 13).



Come traspare dallo schema, la dimensione dello studio affrontato è vasta ed il suo carattere multidisciplinare ha richiesto il lavoro simultaneo di più figure. L'impegno personale si è esteso a tutte le aree con la sola eccezione dell'attività di *scripting* per il calcolo della deformazione superficiale tramite analisi video.

Nell'acquisizione sperimentale degli impatti e nella successiva simulazione computazionale degli stessi è stata presa in considerazione un'unica calzatura sportiva.

Dal momento che le informazioni costruttive (geometria, materiali e struttura interna) necessarie per una modellazione accurata costituiscono spesso e volentieri proprietà industriali dell'azienda manifatturiera e sono pertanto inaccessibili, per contenere gli errori nella realizzazione del modello computazionale è stato preferito un modello di calzatura base. In questo modo, sebbene una conoscenza accurata dei materiali utilizzati e della struttura interna del modello fosse ancora preclusa, il parametro geometrico è stato controllato con successo.

Tale scelta semplificativa se da un lato non ha compromesso l'obiettivo metodologico del presente studio, dall'altro lascia spazio ad ulteriori validazioni con diversi modelli di calzatura.

## Parte sperimentale

In questa sezione si propone una rassegna di tutto ciò che risulta correlato alle sperimentazioni in laboratorio e relative sessioni di acquisizione.

Dopo una preliminare parentesi sul condizionamento ottico delle calzature, indispensabile al successivo calcolo delle deformazioni di superficie, si affronta una descrizione completa della strumentazione adoperata (Figura 14):

- simulatore di impatti, concepito appositamente per l'analisi delle proprietà di smorzamento dinamico;
- telecamera ad alta risoluzione temporale (Phantom Miro 2M, VisionResearch, USA), necessaria all'acquisizione ottica della fenomenologia deformativa a carico della suola;
- piattaforma dinamometrica (Kistler 9281CA, Winterthur, CH), per la trasduzione delle manifestazioni cinetiche impulsive durante la collisione;
- sistema optoelettronico (Vicon MX, Oxford, UK) a sei telecamere, per la cattura del movimento macroscopico del simulatore con cui successivamente pilotare il modello computazionale. La combinazione dei dati di cinematica e cinetica ha inoltre permesso l'estrazione dell'indice di massa efficace.

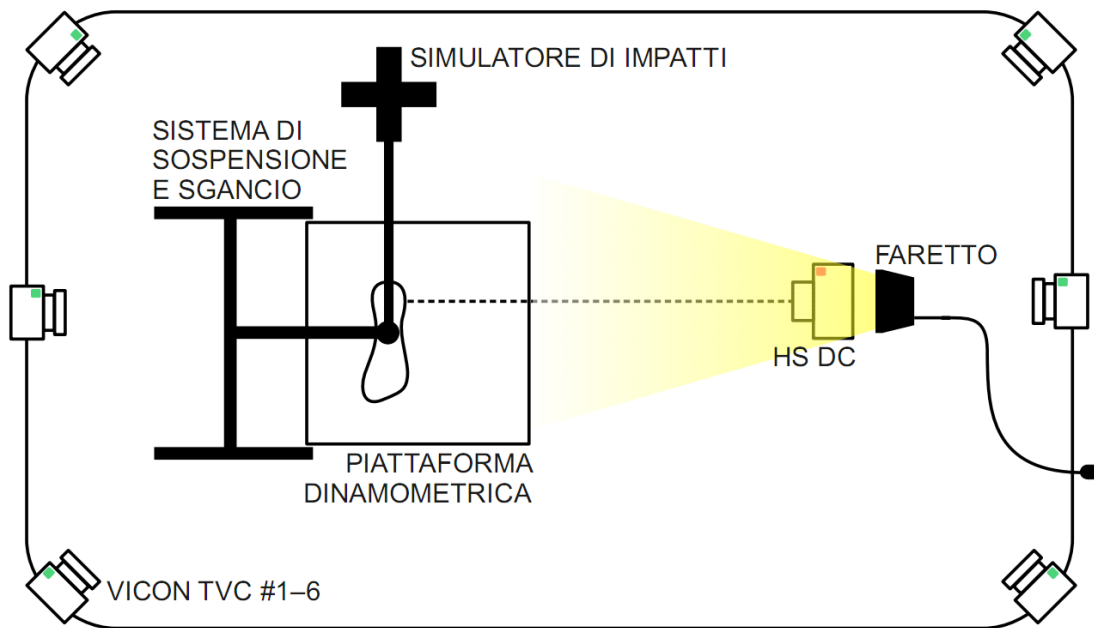


Figura 14: disposizione della strumentazione nel laboratorio. Particolare attenzione è stata riposta nel posizionamento della struttura di sospensione e sgancio, in modo che non influisse sulle acquisizioni cinetiche. Sia in fase di calibrazione che durante le acquisizioni, è stato utilizzato un faretto ( $P_{\text{FARETTO}} = 150 \text{ W}$ ) montato su treppiedi per garantire una sufficiente illuminazione.

Le prove sono state realizzate nel Laboratorio di Analisi del Movimento presso la Facoltà di Fisiologia dell'Università degli Studi di Milano.

## 2.2.1 Preparazione della calzatura

La calzatura analizzata è stata oggetto di un preconditionamento cromatico del tacco, consistente nell'applicazione di uno strato di aggrappante seguito da un velo di vernice all'acqua di colore bianco opaco. Al fine di garantire una buona uniformità cromatica tale procedura è stata ripetuta tre volte ad intervalli temporali compatibili con una perfetta adesione ed asciugatura.

Su questa base è stata successivamente impressa una griglia di *marker* ottici fortemente contrastanti, dimensionata in modo tale da coprire l'intero spessore della suola: nello specifico è stata adottata una disposizione uniforme di elementi circolari ( $\varnothing = 1 \text{ mm}$ ) equispaziati tra loro di 4 mm in direzioni orizzontale e verticale.

Per trasferire questa sequenza di punti con elevata accuratezza è stato realizzato un timbro rotante (Figura 15) costituito da un cilindro metallico ( $\varnothing = 70 \text{ mm}$ ,  $h = 29 \text{ mm}$ ) sulla cui superficie laterale è stata applicata una striscia di fotopolimero con il *pattern* a punti in rilievo.

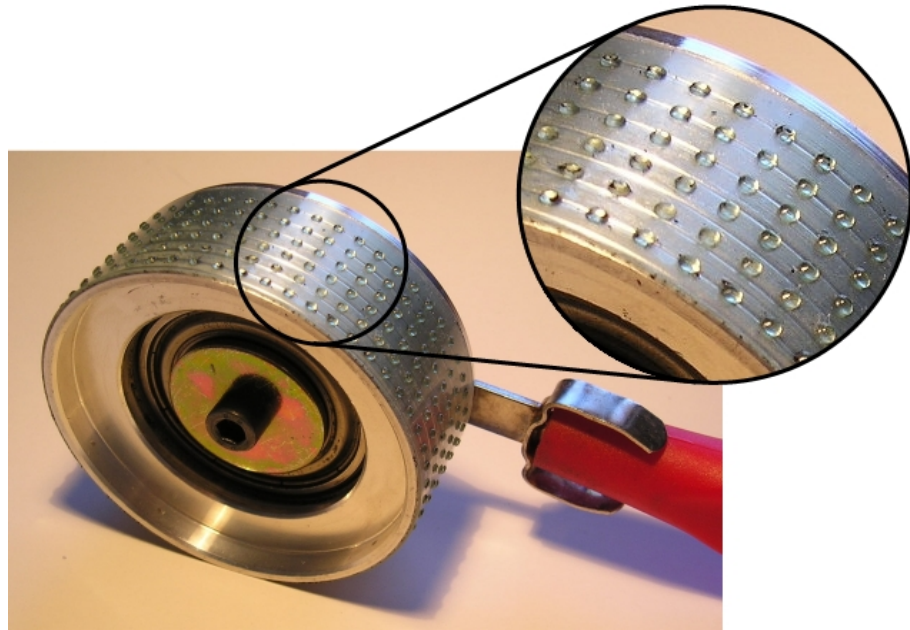


Figura 15: il timbro rotante utilizzato nell'applicazione dei *marker* ottici sul tacco della calzatura indagata. Nell'ingrandimento è visibile la caratteristica puntinatura del rilievo matriciale realizzato a fotopolimero.

Pescando da un comune tampone per inchiostro nero, i *marker* sono stati trasferiti sul retro suola della calzatura: il risultato finale (Figura 16) testimonia la regolarità della griglia di *marker* e l'elevato contrasto di quest'ultima rispetto al fondo bianco.

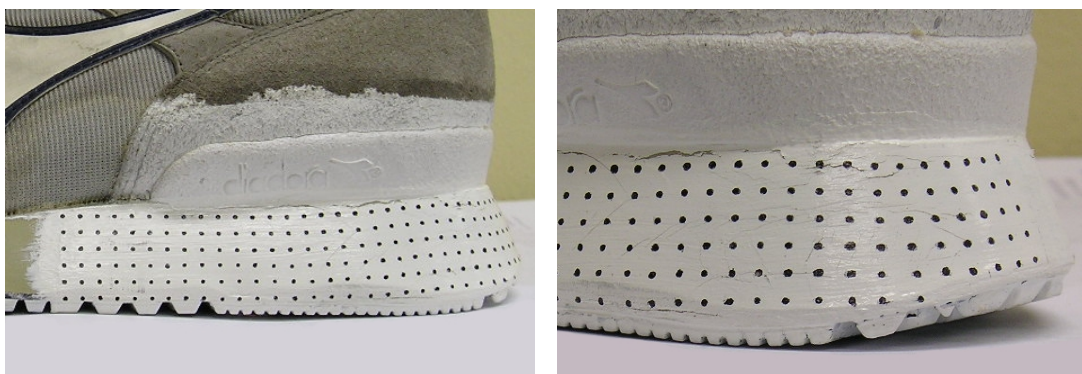


Figura 16: l'utilizzo del timbro rotante ha permesso di applicare i *marker* ottici sulla calzatura con regolarità.

L'applicazione di *marker* facilmente tracciabili ha rappresentato un tassello fondamentale nel processo di validazione dei risultati computazionali: il campionamento ottico dei movimenti superficiali della suola in corrispondenza di detti *marker* ha infatti permesso il calcolo della deformazione di superficie (vedi Paragrafo 2.2.3, “Acquisizioni ottiche ad alta frequenza” e Paragrafo 2.2.5, “Valutazione della deformazione di superficie”), variabile su cui è stata organizzato il discorso di validazione conclusivo.



## 2.2.2 Sistema sperimentale di simulazione impatti

Il simulatore di impatti per sua intrinseca natura offre grande ripetibilità e controllo nei *trial* sperimentali ma non è in grado di replicare integralmente la tipica sequenza cinematica delle estremità distali nell'interazione con il terreno (*heel strike* → *foot flat* → *midstance* → *heel off* → *toe off*), proponendo un'emulazione efficace della sola fase di *heel strike*.

Nonostante questa limitazione meccanica, come precedentemente riportato (vedi Paragrafo 1.1, “Introduzione”) è durante questa fase che le forze scambiate con il terreno mostrano le variazioni più rapide e pertanto è proprio durante la fase di *heel strike* che interessa valutare l'efficacia della calzatura nell'assorbimento dei carichi.

In aggiunta valgono le seguenti osservazioni:

- circa l'80% dei corridori abitudinari attaccano il terreno con il tallone (McClay, 2000);
- l'attività di corsa prevede una sequenza ciclica di impatti al terreno, ciascuno dei quali concentrato in poche decine di ms e caratterizzato da intensità di carico variabile tra due e tre volte il peso corporeo del soggetto (Bobbert et al., 1992; Nigg et al., 1995; Gruber et al., 1998; Whittle, 1999): ogni impatto rappresenta uno *shock* meccanico trasmesso al sistema muscolo-scheletrico (Cavanagh, 1980; Dickinson et al., 1985; Smeathers, 1989; McClay, 2000);
- lo smorzamento di questi eventi impulsivi è tuttora considerato uno dei principali fattori chiave nella prevenzione di infortuni e rappresenta una linea guida fondamentale nella realizzazione di nuove calzature (Cavanagh, 1980; Bruggermann, 2006; Dura et al., 2006; Hennig, 2006; Hennig 2008).

Alla luce di queste considerazioni il dispositivo IS utilizzato permette di studiare le proprietà di *shock absorption* della generica calzatura, rivelando eventualmente la necessità di modifiche progettuali di quest'ultima utili a ridurre la statistica sugli infortuni.

Il sistema IS (Figura 17) è composto dai seguenti elementi:

- una struttura metallica su cui è alloggiato il dispositivo di sgancio regolabile in altezza, costituito da un'elettrocalamita azionabile tramite controllo remoto: modificando l'altezza di caduta si ha un controllo diretto sull'energia potenziale del sistema in quiete e conseguentemente sulla velocità del dispositivo all'istante di impatto;
- la struttura di simulazione impatti, costituita da una robusta base in alluminio alla quale è incernierato un braccio di leva realizzato con lo stesso tipo di profilato metallico (Bosch Rexroth AG, Würzburg, DE): la cinematica di questo braccio è limitata ad una rotazione in un piano normale al terreno ed è tale per cui la sua traiettoria all'impatto è assimilabile alla perpendicolare al suolo. All'estremità libera del braccio di leva un elemento ferromagnetico trasversale assicura l'accoppiamento con il sistema di sospensione e sgancio precedentemente descritto; l'estremità (*foot-last*) su cui viene indossata la calzatura in esame può essere regolata in inclinazione, garantendo un controllo diretto per l'angolo tra piede e suolo al momento dell'impatto.

Le scanalature del profilato hanno consentito di fissare a bullone masse aggiuntive per simulare impatti di differente energia e ricercare configurazioni sperimentali coerenti con la letteratura in termini di massa efficace (vedi Paragrafo 1.4, “Obiettivi dello studio” e Paragrafo 2.2.6, “Indice di massa efficace”). Il sistema può essere ulteriormente personalizzato alternando estremità con complianze differenti in funzione delle esigenze di sperimentazione.

L'elevata massa della base ed il suo fissaggio al terreno con viti hanno annullato eventuali spostamenti della struttura durante l'impatto, mentre l'innescò elettromagnetico del sistema ha assicurato la ripetibilità dei *trial* realizzati.

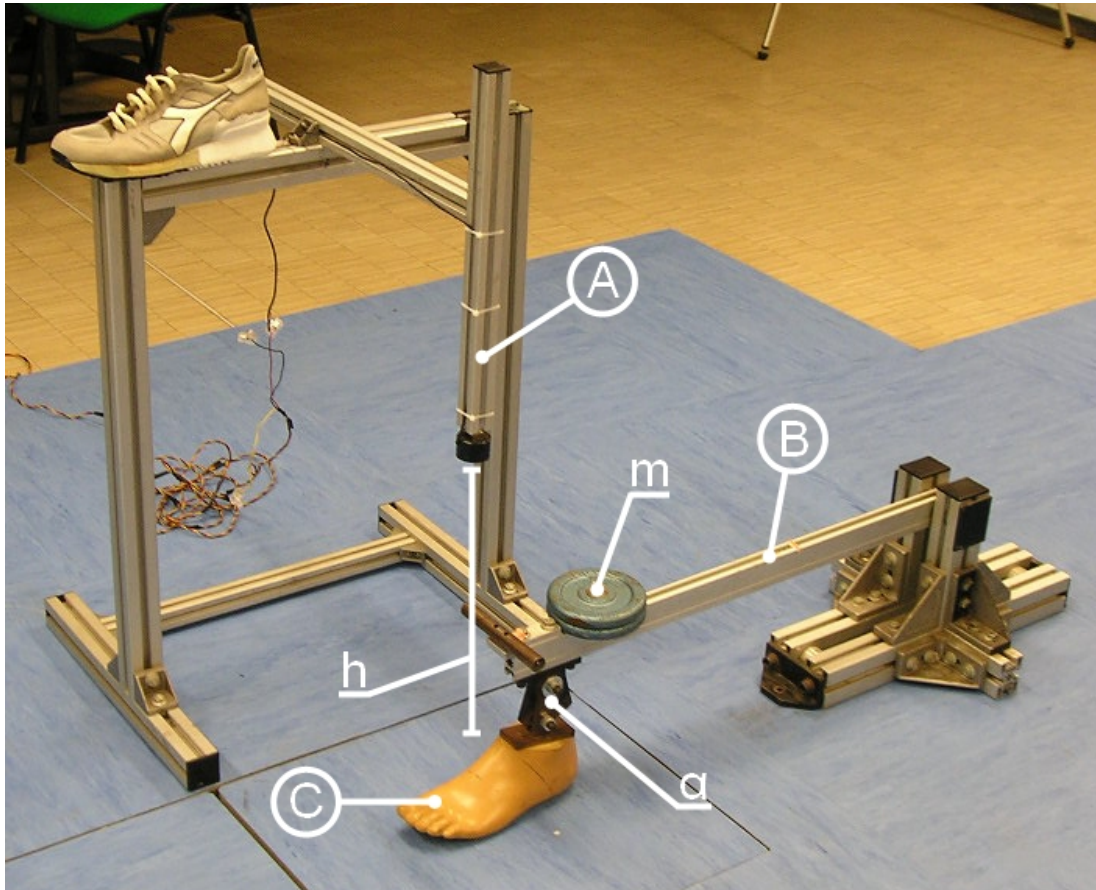


Figura 17: l'apparato sperimentale utilizzato nelle simulazioni di impatto ammette un'espressione cinematica semplice per la riproduzione artificiale della sola fase di *heel strike*. Sulla struttura A è montato il dispositivo di sospensione e sgancio, realizzato con un'elettrocalamita ad altezza  $h$  regolabile. Connesso a questa tramite un apposito elemento ferromagnetico, il braccio di leva B del simulatore e la sua terminazione C. La regolazione di  $\alpha$  e la modulazione del carico addizionale  $m$  consentono di personalizzare gli eventi di impatto in base alle esigenze.

Con esplicito riferimento alle sessioni sperimentali affrontate, l'elettrocalamita è stata posizionata ad un'altezza  $h = 460$  mm dal suolo: conseguentemente a questa scelta, in condizioni di quiete la calzatura si trova ad una quota di 200 mm rispetto al piano di impatto.

Il giunto meccanico che consente di modificare l'inclinazione del *foot-last* è stato regolato in modo tale che l'angolo tra superficie di appoggio e calzatura al terreno misurasse  $15^\circ$  circa. Questa configurazione risulta compatibile con le corrispondenti indicazioni di

letteratura che riportano valori pari a  $12.2 \pm 5^\circ$  (Ferber et al., 2006); essa inoltre rappresenta la migliore approssimazione possibile del riferimento citato a fronte della particolare struttura del giunto e della sua quantizzazione per i valori di  $\alpha$ .

Relativamente al carico di massa aggiuntiva, sono state considerate due configurazioni:

- $m = 2$  kg applicata con braccio  $b = 590$  mm;
- $m = 5$  kg applicata con braccio  $b = 530$  mm.

Il confronto con la letteratura sulla massa efficace del piede nella corsa ( $M_{EFF} = 3.6$  kg, corrispondente a  $\sim 5\%$  della massa corporea complessiva. Ker et al., 1989; Chi e Schmitt, 2005) è stato realizzato sulla base dei valori di tale parametro calcolati per entrambe le configurazioni. Allo stesso modo anche la validazione dell'indagine computazionale ha potuto beneficiare della doppia casistica.

Nella scelta dell'estremità, per facilitarne la successiva modellazione computazionale, è sembrato più conveniente adottare una forma in resina uniformemente rigida piuttosto che un piede protesico compliant. Questa opzione è compatibile con l'obiettivo dello studio, focalizzato non tanto su una riproduzione fine dell'impatto reale quanto sulla validazione di un metodo di indagine predittiva di interesse biomeccanico ed industriale.

### 2.2.3 Acquisizioni ottiche ad alta frequenza

La deformazione della *midsole* all'impatto è stata acquisita nel tempo mediante una telecamera digitale ad elevata risoluzione temporale (Phantom Miro 2M, VisionResearch, USA).

La telecamera è stata posizionata ad una distanza di 1 m dal simulatore di impatti (Figura 18) con l'asse ottico ortogonale al piano di movimento e l'obiettivo regolato in modo tale da mettere a fuoco l'intorno spaziale teatro degli eventi di impatto.

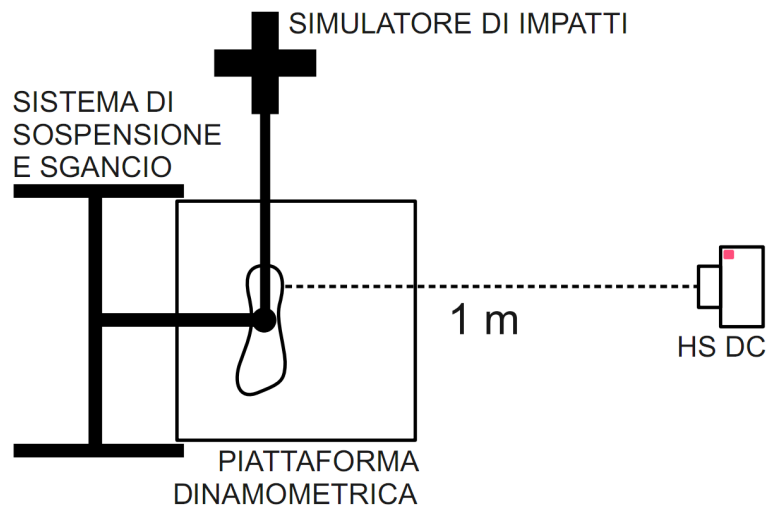


Figura 18: rappresentazione schematica della disposizione relativa tra simulatore di impatti ed HS DC. La distanza interposta è di 1 m; l'asse ottico della telecamera è ortogonale al piano di escursione del braccio dell'IS.

La risoluzione del quadro immagine è stata impostata a  $640 \times 480$  *pixel*, consentendo di adottare una frequenza di campionamento pari a 1200 Hz.

Prima di procedere con le acquisizioni degli impatti il dispositivo è stato calibrato in funzione della sua posizione e lunghezza focale.

A questo scopo sono state realizzate acquisizioni statiche (Figura 19) e dinamiche (Figura

20) di una griglia regolare di 7×7 elementi circolari applicata ad un supporto piano di dimensioni 90×90 mm.

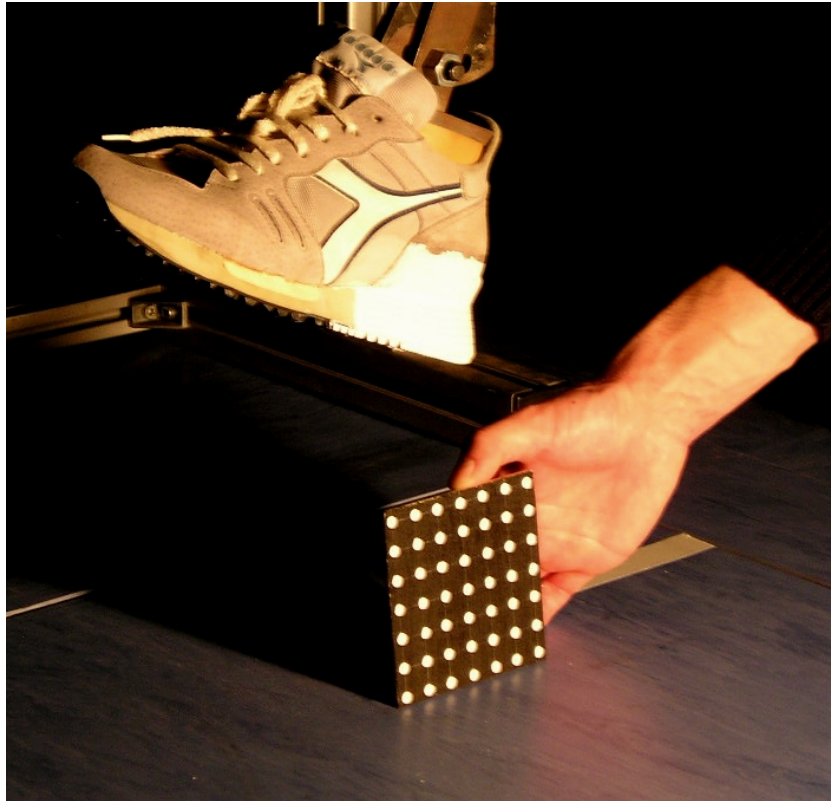


Figura 19: calibrazione statica per la telecamera ad alta risoluzione temporale. In entrambe le sessioni di calibrazione statica e dinamica la frequenza di campionamento è stata limitata a 20 Hz.

Le acquisizioni sono state elaborate con una procedura semiautomatica per l'identificazione degli stessi elementi circolari in 50 *frame* consecutivi; sulla base di questo risultato e delle specifiche dimensionali della griglia di calibrazione è stato costruito il funzionale

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\| m_{ij} - M(A, R_i, t_i, M_j) \right\|^2$$

in cui:

- $n$  è il numero di *frame* a disposizione (50) ed  $i$  è l'indice che li scorre;

- $m$  è il numero di elementi circolari sul supporto (49) e  $j$  è l'indice associato;
- $m_{ij}$  identifica l'elemento  $j$ -esimo al *frame*  $i$ -esimo;
- $m(A, k_1, k_2, R_i, t_i, M_j)$  è la proiezione del punto  $M_j$  nel *frame*  $i$ ;
- $A$  è la matrice dei parametri interni della telecamera e contiene le coordinate del punto principale  $(u_0, v_0)$ , i fattori di scala per il sistema di coordinate immagine ( $\alpha$  e  $\beta$ ) ed un parametro relativo all'apertura angolare dei due assi ( $c$ );
- $R_i$  e  $t_i$  sono i parametri esterni e definiscono la rototraslazione del sistema di riferimento della telecamera rispetto al riferimento globale.

Il funzionale rappresenta l'errore quadratico medio commesso nelle proiezioni e la sua minimizzazione tramite l'algoritmo di Levenberg – Marquardt ha consentito di ottenere una stima verosimile dei parametri di calibrazione della HS DC (Zhang, 1999), tra cui i fattori di scala necessari per convertire misure immagine in dimensioni reali:

- $\alpha = 0.2969 \text{ mm/pixel}$ ;
- $\beta = 0.2963 \text{ mm/pixel}$ .

Per compensare le distorsioni introdotte dall'ottica, durante la procedura di minimizzazione è stato valutato ed utilizzato un modello a cinque coefficienti (Brown, 1971)

$$u_D = u \cdot (1 + K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4 + K_5 \cdot r^6) + 2K_3 \cdot u v + K_4 \cdot (r^2 + 2u^2)$$

$$v_D = v \cdot (1 + K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4 + K_5 \cdot r^6) + K_3 \cdot (r^2 + 2v^2) + 2K_4 \cdot u v$$

in cui:

- il secondo membro è composto da termini di distorsione radiale (a sinistra) e tangenziale (a destra);
- $(u, v)$  sono le coordinate di un generico punto proiettato nel mondo immagine con una trasformazione ideale immune alle distorsioni;
- $(u_D, v_D)$  sono le coordinate dello stesso punto comprensive della modellazione di distorsione;
- $K_{1,2,\dots,5}$  sono i cinque coefficienti del modello;

- $r = \sqrt{u^2 + v^2}$  .

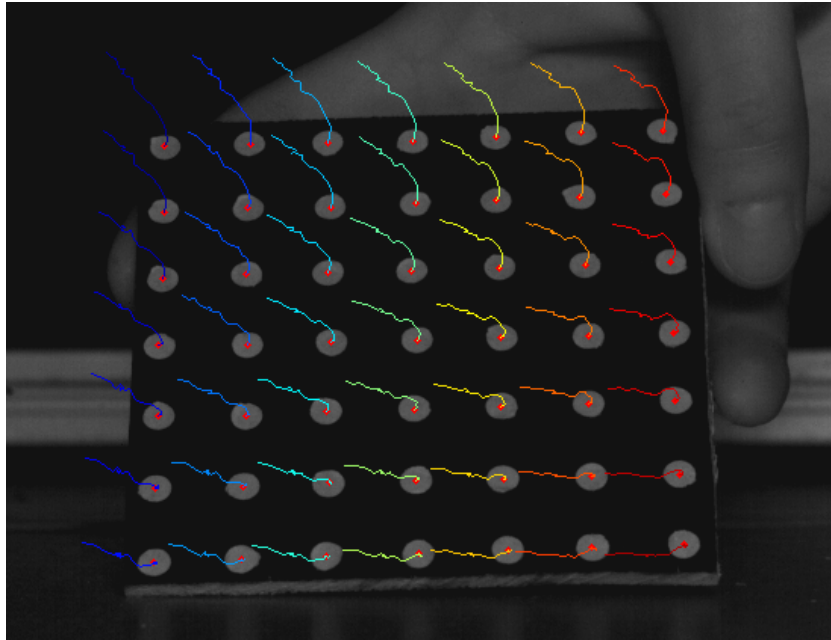


Figura 20: la procedura di inseguimento in calibrazione dinamica. Ogni elemento circolare sul supporto viene identificato in posizione tramite le coordinate del centroide associato; le scie rappresentano la storia di tali posizioni, limitata ai precedenti 20 *frame*.

Come dichiarato in precedenza (vedi Paragrafo 1.4, “Obiettivi dello studio”) nel presente studio è stato fatto uso di un unico gruppo di acquisizione ottica, con l'inevitabile limitazione nella descrizione deformativa al solo piano normale all'asse ottico.

Tuttavia il *software* utilizzato risulta già predisposto per l'identificazione di parametri di calibrazione estrinseci ed intrinseci: l'estensione al caso stereofotogrammetrico con più gruppi ottici è pertanto di rapida applicazione.

Dopo la calibrazione preliminare, le acquisizioni video degli impatti sono state processate con il *software* in dotazione alla telecamera (Phantom Camera Software v.9.0.663, VisionResearch, USA) in modo da isolare in ogni sequenza l'intervallo relativo al primo impatto della calzatura al suolo.

Ogni acquisizione è stata infine salvata nel comune formato Audio Video Interleave.



## 2.2.4 Acquisizione di cinematica e cinetica

Le simulazioni di impatto sono state acquisite anche in termini di cinematica e cinetica mediante un sistema optoelettronico di analisi del movimento ( $f_{\text{CAMPIONAMENTO CINEMATICA}} = 100 \text{ Hz}$ ) ed una pedana dinamometrica ( $f_{\text{CAMPIONAMENTO CINETICA}} = 2 \text{ kHz}$ ).

I test hanno avuto luogo nel Laboratorio di Analisi del Movimento presso la Facoltà di Fisiologia dell'Università degli Studi di Milano, dotato di una piattaforma di forza piezoelettrica Kistler 9281CA (Kistler, Winterthur, CH) e di un sistema optoelettronico Vicon MX (Vicon, Oxford, UK) a sei telecamere.

Per l'acquisizione della cinematica è stato adottato un protocollo essenziale costituito da due *marker* rifrangenti standard ( $\varnothing = 15 \text{ mm}$ ) applicati sul braccio di leva dell'IS ad una distanza relativa di 400 mm (Figura 21).



Figura 21: il protocollo di acquisizione della cinematica ha previsto l'applicazione di due soli *marker* rifrangenti sul braccio dell'IS per la cattura della sua escursione angolare.

Al pari della HS DC, anche piattaforma di forza e sistema optoelettronico sono stati calibrati prima delle acquisizioni:

- nel caso della piattaforma è stata effettuata una rilevazione statica di una massa standard di 10 kg;
- per il sistema optoelettronico è stata utilizzata la procedura *wand* (Vicon MX Hardware System Reference v.1.4, 2006). Il volume di lavoro, identificato con il volume di ingombro dell'IS, è stato scandagliato con una bacchetta contenente elementi rifrangenti a distanza nota per avere una stima dell'accuratezza (errore massimo tollerato = 0.1 mm) con cui i *marker* interni a tale volume sarebbero stati successivamente acquisiti.

Con l'intera strumentazione calibrata e le impostazioni precedentemente elencate è stata affrontata la sessione di acquisizioni vera e propria, articolata in un numero complessivo di 16 prove suddivise come segue:

- *trial* 1 – 8:  $m = 2$  kg;
- *trial* 9 – 16:  $m = 5$  kg.

## 2.2.5 Valutazione della deformazione di superficie

I video degli impatti sono stati esaminati al computer per valutare la deformazione superficiale.

Ciascuna acquisizione video è stata analizzata con uno *script* dedicato sviluppato in Matlab (The MathWorks, Inc., Natick, MA, USA) che ha consentito:

- il riconoscimento dei *marker* ottici applicati alla calzatura (vedi Paragrafo 2.2.1, “Preparazione della calzatura”);
- l'inseguimento (*tracking*) degli stessi nel tempo;
- il calcolo degli spostamenti e delle deformazioni superficiali associate.

Lo schema seguente (Figura 22) mostra il *workflow* dell'algoritmo per la stima degli spostamenti dei *marker* posizionati sulla calzatura.

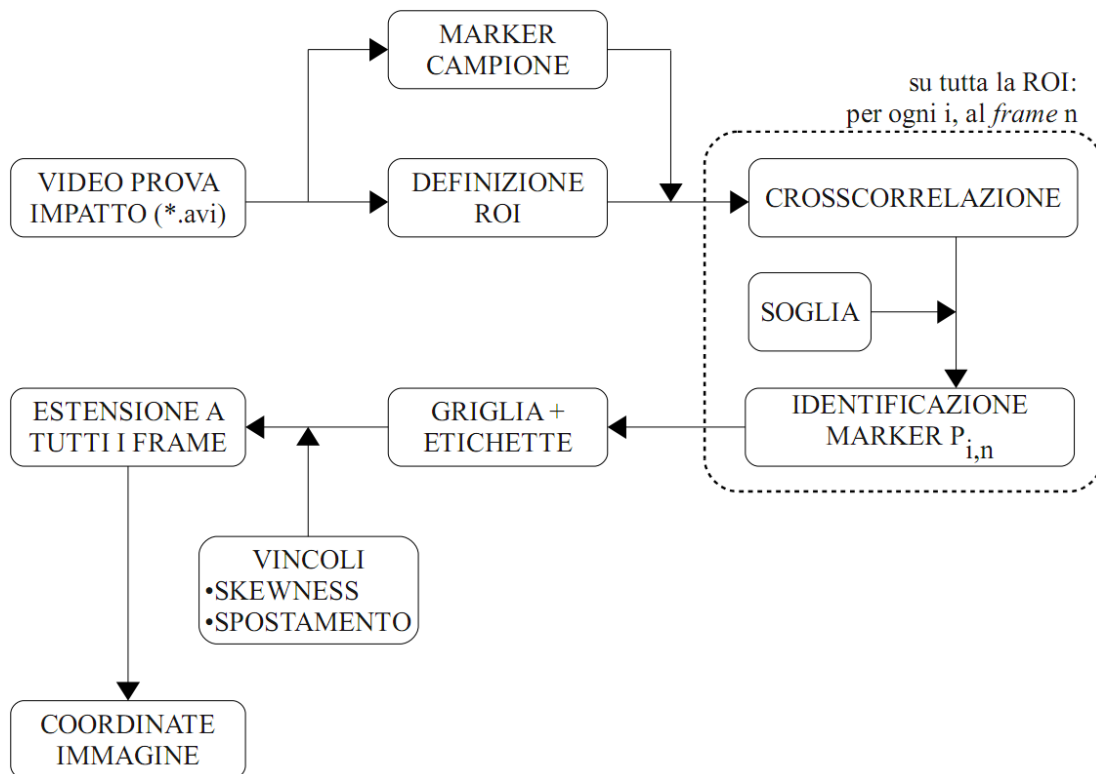


Figura 22: mappa concettuale dell'algorithmo deputato al riconoscimento dei *marker* ottici applicati alla suola. L'indice  $i$  scorre i *marker* mentre  $n$  identifica il *frame*.

Di seguito se ne illustrano sinteticamente i passaggi fondamentali:

1. selezionato il video da analizzare, viene richiesto all'utente di individuare con la periferica di puntamento i quattro *marker* associati ai vertici dell'ipotetico quadrilatero contenente l'intera matrice di punti (*region of interest*, ROI) e successivamente un *marker* campione tra tutti quelli visibili, preferibilmente ben contrastato;
2. i *marker* interni alla ROI definita al punto precedente vengono identificati tramite il calcolo della matrice di cross-correlazione veloce (Haralick, 1992; Lewis, 1995) tra una finestra centrata sul baricentro del *marker* campione e la stessa ROI

$$CC(u, v) = \frac{\sum_{x,y} [ROI(x, y) - \overline{ROI}_{u,v}] [Sample(x-u, y-v) - \overline{Sample}]}{\left\{ \sum_{x,y} [ROI(x, y) - \overline{ROI}_{u,v}]^2 \sum_{x,y} [Sample(x-u, y-v) - \overline{Sample}]^2 \right\}^{0.5}}$$

dove:

- $\overline{\text{Sample}}$  è la media *pixel per pixel* in luminosità della finestra campione;
- $\overline{\text{ROI}}_{u,v}$  rappresenta la media in luminosità di ROI (x,y) nella regione sottostante la finestra campione.

La matrice di cross-correlazione viene quindi codificata in binario tramite l'imposizione di una soglia (0.5) che consenta di discriminare le regioni della ROI maggiormente correlate al campione. I centroidi di queste regioni rappresentano le posizioni dei *marker* sulla suola;

3. i *marker* così individuati vengono connessi tramite procedura automatica in una griglia di elementi quadrangolari (Figura 23). Una griglia predefinita, con righe e colonne in numero identico al reticolo dei *marker* sulla suola, viene adattata sui dati sperimentali imponendo la corrispondenza tra i suoi nodi ed i *marker* rintracciati al passo precedente. Il codice provvede quindi all'assegnazione di un'etichetta numerica ad ogni singolo punto;

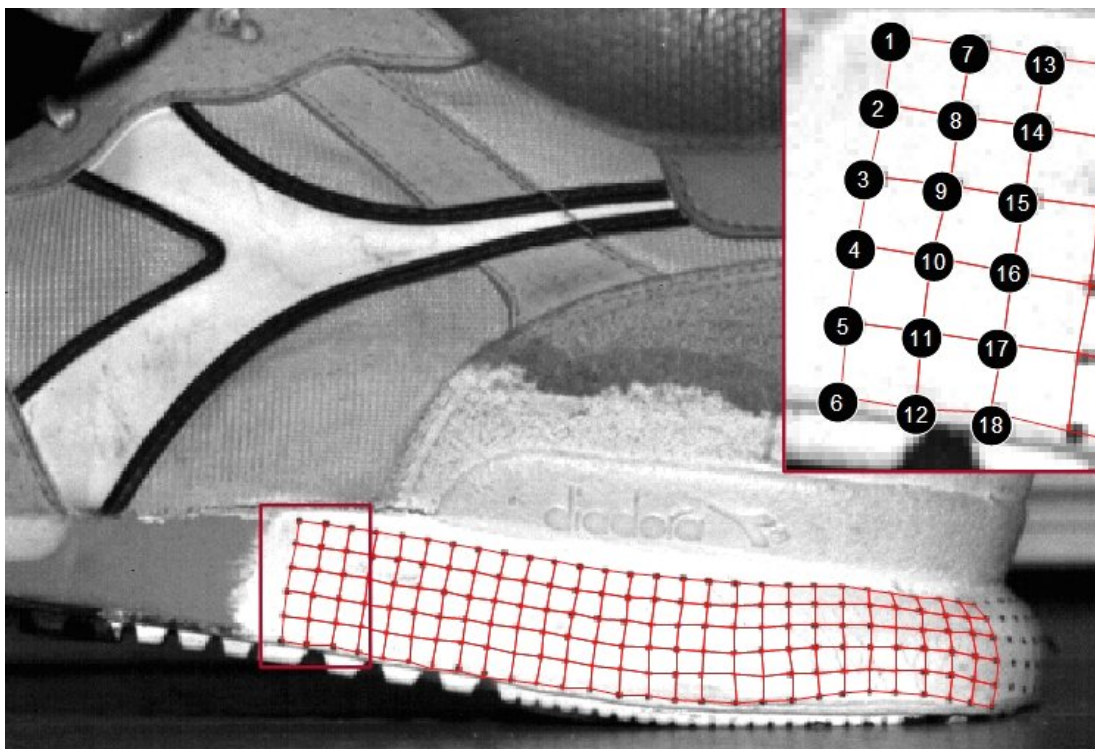


Figura 23: risultato di identificazione dei *marker* operata dallo *script* per il generico *frame*  $n$ . Come visibile in figura, alcuni *marker* del tacco vengono esclusi dal riconoscimento per incompatibilità prospettica con la posizione della telecamera, responsabile di valori di cross-correlazione inferiori alla soglia. In questo caso il codice ha identificato con successo 168 *marker* disposti in un reticolo  $6 \times 28$ .

4. le etichette vengono estese nel tempo stimando ricorsivamente la posizione di ciascun *marker* in un generico *frame* a partire dalla posizione dello stesso *marker* nel *frame* precedente. Operativamente, la posizione  $P_{i,n}$  ( $x_{i,n}$ ,  $y_{i,n}$ ) occupata dal *marker*  $i$ -esimo all' $n$ -esimo *frame* viene stimata sulla base della posizione dello stesso punto all'istante di campionamento precedente  $P_{i,n-1}$  ( $x_{i,n-1}$ ,  $y_{i,n-1}$ ) tramite il calcolo della cross-correlazione normalizzata  $CC_{i,n}$  tra una finestra  $D_{i,n-1}$  contenente il *marker*  $i$ -esimo al *frame*  $n-1$  e una finestra di ricerca  $W_{i,n}$  centrata in  $P_{i,n}$  ( $x_{i,n}$ ,  $y_{i,n}$ ). La posizione del massimo di  $CC_{i,n}$  consente la valutazione dello spostamento  $D_{i,n}$  ( $dx_{i,n}$ ,  $dy_{i,n}$ ) subito dal *marker*  $i$ -esimo tra *frame*  $i-1$  ed  $i$ .

La posizione di  $P_{i,n}$  ( $x_{i,n}$ ,  $y_{i,n}$ ) può essere pertanto calcolata come

$$P_{i,n}(x_{i,n}, y_{i,n}) = P_{i,n-1}(x_{i,n-1}, y_{i,n-1}) + D_{i,n}(dx_{i,n}, dy_{i,n}) \quad .$$

Al fine di evitare falsi riconoscimenti e garantire la robustezza dell'algoritmo, è stato introdotto un vincolo per garantire l'uniformità negli spostamenti dei punti tra il generico *frame*  $n$  ed il successivo. Considerata l'alta frequenza di acquisizione e la connessione fisica tra i *marker*, tale vincolo è stato implementato sulla base delle seguenti osservazioni:

- la distorsione angolare (*skewness*) degli elementi della griglia non può variare significativamente tra *frame* consecutivi;
- *marker* adiacenti condividono spostamenti analoghi.

Tutti i riconoscimenti incompatibili con queste prescrizioni vengono ignorati e lo spostamento dei punti contestuali è stimato come media dello spostamento dei *marker* limitrofi.

Alla completa identificazione degli spostamenti dei *marker* in coordinate immagine segue la conversione degli stessi in coordinate reali, attraverso i fattori in mm/*pixel* ottenuti dalla calibrazione (vedi Paragrafo 2.2.3, “Acquisizioni ottiche ad alta frequenza”). Le posizioni dei marcatori indicizzate su scala millimetrica sono state dunque usate per il calcolo del campo di deformazione superficiale a carico della *midsole* nell'ipotesi approssimata di stato di deformazione piana, adottata in conseguenza dell'unico gruppo di acquisizione ottica disponibile.

Anche per questa operazione è stato fatto uso di un codice sviluppato in ambiente Matlab e basato su una veloce interpretazione del metodo degli elementi finiti, comprensiva di non linearità cinematiche.

Considerando a titolo esemplificativo il generico *frame*  $n$  dell'acquisizione, tale codice:

1. suddivide la griglia di connessione tra i *marker* negli elementi quadrangolari a quattro nodi che la compongono;
2. applica ad ogni singolo elemento una mappatura geometrica rispetto ad un elemento *master* conveniente (Figura 24), per il quale è temporaneamente istituito

un sistema di coordinate 2D ortonormale e centrato di assi  $s_1$  ed  $s_2$ . Le coordinate globali dei *marker* che delimitano ogni elemento, note dall'applicazione del codice precedente, vengono trasposte in questo sistema di riferimento locale;

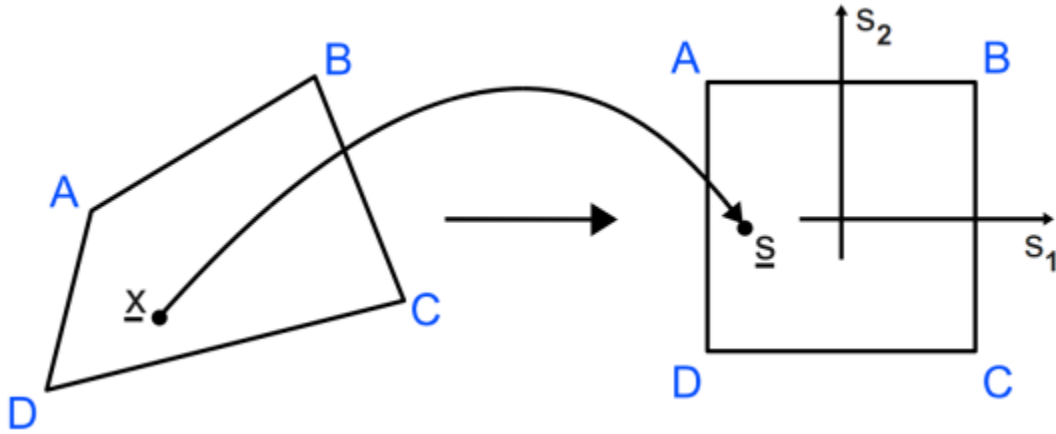


Figura 24: rappresentazione concettuale della mappatura geometrica del generico elemento quadrangolare nel suo progenitore (elemento *master*). Il passaggio al sistema di riferimento locale consente una scrittura comoda delle funzioni di forma per l'interpolazione degli spostamenti noti ai vertici e la conseguente estrazione del campo di deformazioni.

3. ripristina la continuità del campo di spostamenti sull'intero elemento tramite un'interpolazione lineare degli spostamenti ai nodi con le funzioni di forma

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_A & 0 & N_B & 0 & N_C & 0 & N_D & 0 \\ 0 & N_A & 0 & N_B & 0 & N_C & 0 & N_D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1^A \\ u_2^A \\ u_1^B \\ u_2^B \\ u_1^C \\ u_2^C \\ u_1^D \\ u_2^D \end{bmatrix}$$

dove:

- il vettore di componenti  $u_{1,2}^i$  contiene gli spostamenti noti ai nodi lungo le direzioni  $s_1$  ed  $s_2$ ;



- le funzioni di forma lineari 2D scritte per l'elemento *master* hanno struttura  $N_i(s_1, s_2) = \frac{1}{4} (1 \pm s_1) (1 \pm s_2)$ ;
- $u_1$  e  $u_2$  rappresentano le componenti del campo di spostamento continuo sull'intero elemento.

Estendendo l'operazione a tutti gli elementi della griglia originale si ottiene un'interpolazione continua degli spostamenti sull'intera ROI;

4. per ogni elemento, calcola l'espressione deformativa coerentemente alla teoria delle grandi deformazioni in corrispondenza del centroide, mappato come il punto di coordinate  $s_1, s_2 = 0$  nel sistema di riferimento locale. Nello specifico:
  - si identifica in  $H$  il tensore gradiente di spostamento, contenente le derivate parziali degli spostamenti rispetto alle coordinate globali;
  - il tensore gradiente di deformazione viene costruito come  $F = H + I$ , essendo  $I$  matrice identità;
  - la deformazione nominale viene infine calcolata coerentemente alla sua definizione  $NE = \sqrt{F \cdot F^T} - I$ .

Data la linearità delle funzioni di forma  $N_i$ , la distribuzione delle deformazioni non può che essere costante sul singolo elemento; i valori di deformazione rintracciati vengono associati ai centroidi di ogni elemento, consentendo una successiva interpolazione sulla ROI utile a recuperare una mappa continua di deformazione piana.

## 2.2.6 Indice di massa efficace

Per esplorare la legittimità del confronto tra gli impatti replicati dall'IS ed analoghe sperimentazioni in vivo documentate in letteratura, è stato ricercato il parametro di massa efficace per il piede.

Per massa efficace (*effective mass*) si intende quella frazione di massa di un soggetto concretamente coinvolta nell'interazione dinamica: nel caso specifico del piede, essa coincide con la massa corrispondente all'azione applicata al terreno durante la fase di primo appoggio, caratterizzata da una manifestazione cinetica impulsiva in conseguenza della rapida decelerazione corporea (Ker et al., 1989; Chi e Schmitt, 2005).

Si tratta di un parametro che è stato convenientemente introdotto nelle analisi biomeccaniche per sintetizzare i numerosi fattori in gioco nell'interazione umana con il mondo esterno.

Tra gli studi sperimentali presenti in letteratura che si sono specificamente occupati del calcolo di questo parametro, è stato individuato un riferimento operativo in Chi e Schmitt (2005). L'indagine degli autori in questione ha coinvolto sei soggetti adulti, sani e senza alcuna storia pregressa di infortuni a carico degli arti inferiori: per ciascuno dei partecipanti sono state acquisite cinematica degli arti inferiori e forze di reazione al terreno nell'espressione di differenti modalità di locomozione (cammino, corsa e camminata accovacciata).

Nella scelta di un approccio matematico funzionale al calcolo di massa efficace, gli autori hanno ritenuto che il metodo impulso – momento (*impulse – momentum method*, IMM) fosse in grado di fornire stime più accurate del parametro in relazione alla natura impulsiva degli eventi indagati

$$M_{\text{EFF}} = \frac{\int_{t_i}^{t_f} F_{\text{PAD}} \cdot dt}{\Delta v + g \cdot \Delta t}$$

dove:

- $t_i$  è l'istante iniziale della fase di impatto;
- $t_f$  è associato all'istante di primo picco massimo per la reazione vincolare al suolo;
- al denominatore,  $\Delta v = v_f - v_i$  è la differenza tra le velocità agli istanti  $t_f$  e  $t_i$ ;
- $\Delta t$  è la finestra temporale durante la quale si consuma la fase di impatto iniziale, immediatamente successiva all'*heel strike*.

Il termine di forza presente nella relazione ( $F_{\text{PAD}}$ ) può essere ricondotto alla sola componente verticale della GRF perché tale componente rappresenta da sola più del 90% della reazione vincolare al terreno complessiva durante la fase di impatto (Cavanagh, 1990); in aggiunta, la caratteristica traiettoria per il braccio dell'IS in prossimità del suolo (vedi Paragrafo 2.2.2, “Sistema sperimentale di simulazione impatti”) ha contribuito a convalidare questa opzione. Conseguentemente, anche per la velocità è possibile fare riferimento alla sola proiezione lungo la verticale.

Per i *trial* di corsa, gli autori hanno valutato la massa efficace del piede in  $5.30 \pm 1.75\%$  della massa corporea totale, mediando su un totale di 24 ripetizioni. Questo risultato è coerente con un altro studio (Ker et al., 1989) in cui  $M_{\text{EFF}} \sim 5\%$  della massa corporea, ovvero 3.60 kg in relazione ai soggetti considerati.

L'espressione per il calcolo di  $M_{\text{EFF}}$  prevede la combinazione di un termine di cinetica ( $F_{\text{PAD}}$ ) ed uno di cinematica ( $\Delta v$ ) ma la nostra strumentazione ha acquisito tali grandezze con risoluzioni temporali nettamente distinte (vedi Paragrafo 2.2.4, “Acquisizione di cinematica e cinetica”): ciò ha reso necessario un sovracampionamento ( $f_{\text{IN}} = 100 \text{ Hz}$ ;  $f_{\text{OUT}} = 2 \text{ kHz}$ ; interpolazione *spline*) delle tracce cinematiche.

Non è stato ritenuto opportuno applicare ulteriori condizionamenti o filtraggi alle serie di dati.

## Parte computazionale

Questa parte del documento si focalizza sulla simulazione computazionale degli eventi sperimentali descritti in precedenza: gli eventi di impatto nei due casi di massa aggiuntiva ( $m = 2 \text{ kg}$  e  $m = 5 \text{ kg}$ ) sono stati replicati virtualmente attraverso un modello numerico basato sulla teoria degli elementi finiti ed implementato nel codice commerciale Abaqus/Explicit v.6.8-1 (Simulia, Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, FR).

Delineate le modalità per la generazione e l'assemblaggio delle geometrie nel modello, si affronta la descrizione di dettagli tipicamente modellistici, come la caratterizzazione meccanica dei domini di calcolo, la definizione delle interazioni di contatto e l'applicazione delle condizioni al contorno. Da ultimo viene affrontato uno studio di sensitività alla ricerca della migliore discretizzazione dei volumi in relazione ad un compromesso tra qualità di grandezze indice e costo computazionale.

### 2.3.1 Costruzione del modello geometrico

Per la simulazione computazionale degli eventi sperimentali di impatto è stato necessario costruire un modello geometrico rappresentativo delle strutture coinvolte.

Come primo passo è stata affrontata la digitalizzazione della geometria della calzatura. Tale operazione è risultata particolarmente problematica per l'assenza dei disegni CAD della suola. Per ovviare tale carenza è stato necessario ricostruirne il volume tramite elaborazione di dati grezzi ottenuti da scansioni laser (3DLS, CNR Milano, IT) (Figura 25).

Si sottolinea come, in funzione della modalità adottata per la ricostruzione ed indipendentemente dalla cura riposta in tale operazione, l'accuratezza finale della suola non possa vantare una risoluzione migliore del millimetro. Questo aspetto costituisce una limitazione accettabile in relazione allo scopo dello studio.



Figura 25: lo scanner a lama di luce laser ( $\lambda = 650 \text{ nm}$ ) utilizzato per l'acquisizione della geometria della calzatura. La risoluzione spaziale con la calibrazione adottata è di  $0.5 \text{ mm}$ ; nel sensore è integrato un filtro passabanda centrato sulla frequenza corrispondente a  $\lambda$  ( $f_{PB} = 4.612 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ ), utile ad escludere interferenze dovute a radiazioni elettromagnetiche di differente contenuto energetico. Indipendentemente da questo accorgimento *hardware*, le scansioni sono state eseguite in ambiente riparato in modo tale da limitare a priori i disturbi della radiazione ambientale solare. Il sistema di irradiazione è assistito da un motore in continua che controlla il beccheggio della sorgente di luce laser; l'albero di tale motore è accoppiato con un *encoder* per una trasduzione quantizzata della sua rotazione. I comandi al motore vengono impartiti dall'*hardware* interno (a destra), una mini EPIA con sistema operativo *custom Linux*. L'operatore interagisce con lo scanner attraverso un'interfaccia grafica su *touch screen*, tramite la quale è possibile regolare i parametri di acquisizione.

La calzatura è stata indossata su un'estremità protesica ed acquisita da differenti angolazioni per ottenere nuvole di punti sufficienti a descriverne in modo esaustivo la geometria. Queste nuvole, caratterizzate da una significativa mutua sovrapposibilità, sono

state in seguito assemblate con il *software* Geomagic Studio 7 (Geomagic, Research Triangle Park, NC, USA): sfruttando il riconoscimento da parte dell'utente di dettagli inequivocabilmente presenti in due nuvole parzialmente sovrapposte, il programma ha consentito di combinare le nuvole di acquisizione parziale minimizzando gli errori nel posizionamento relativo. Estendendo l'operazione a tutte le nuvole disponibili la calzatura è stata interamente digitalizzata e la sua geometria salvata come un'unica nuvola di punti in un documento di stereolitografia.

Il *file* \*.STL è stato poi ulteriormente elaborato al fine di:

- ridurre l'elevata densità nella descrizione spaziale della geometria. La ricchezza informativa delle scansioni originali era infatti eccessiva ed incompatibile con un'efficiente ricostruzione matematica del volume per interpolazione della nuvola di punti assemblata. La nuvola è stata dunque sfoltita tramite l'applicazione di mirati *script awk* all'insieme delle coordinate; la connettività dei singoli punti è stata successivamente ripristinata con Amira v.5.2 (Visage Imaging, Inc., San Diego, CA, USA);
- estrarre dall'intera scansione la regione di reale interesse. La nuvola di punti infatti rappresenta una copia digitale dell'intera calzatura mentre ai fini della modellazione computazionale interessa solo la geometria della suola. Per isolare quest'ultima, la nuvola a densità ridotta è stata progressivamente scolpita in Gambit v.2.4.6 (ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA) fino a raggiungere una geometria verosimile. Nel modello digitale è stato tuttavia trascurato lo strato inferiore del battistrada (*outsole*), supposto in questa fase non determinante per le proprietà di assorbimento dinamico e correlato alla sola protezione della *midsole* da fenomeni di usura.

Il modello geometrico dell'estremità montata sull'IS è stato ottenuto da una precedente acquisizione laser. Anche in questo caso, per ridimensionare la ricchezza informativa contenuta nella scansione è stata applicata una procedura di sottocampionamento spaziale secondo le modalità già descritte (*script awk* e ripristino della connettività con Amira).

Infine, il modello dell'estremità è stato convenientemente orientato nello spazio attraverso

una trasformazione rototraslatoria in sintassi Matlab.

A partire dal modello geometrico dell'estremità caricato in Gambit è stato sinteticamente sviluppato il resto del simulatore, ponendo particolare attenzione nel replicarne le caratteristiche dimensionali chiave ai fini della simulazione.

La schematizzazione adottata viene mostrata nella seguente figura (Figura 26).

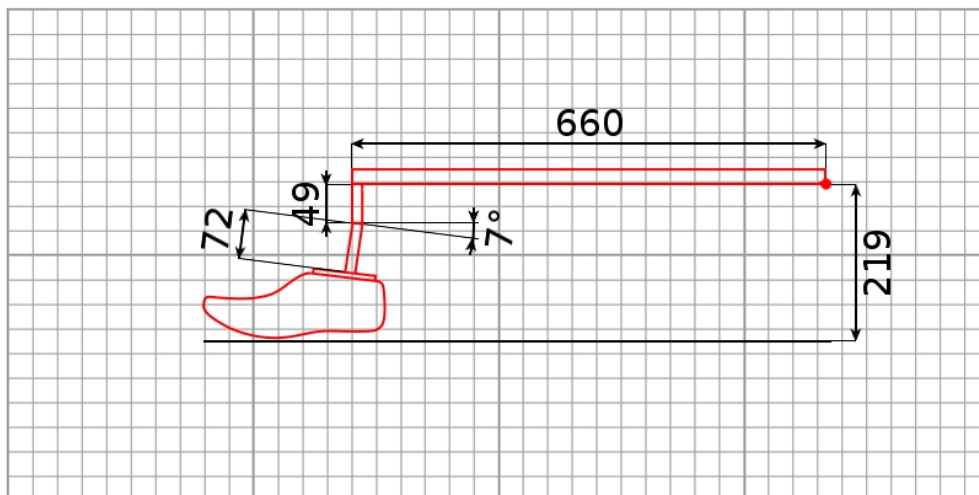
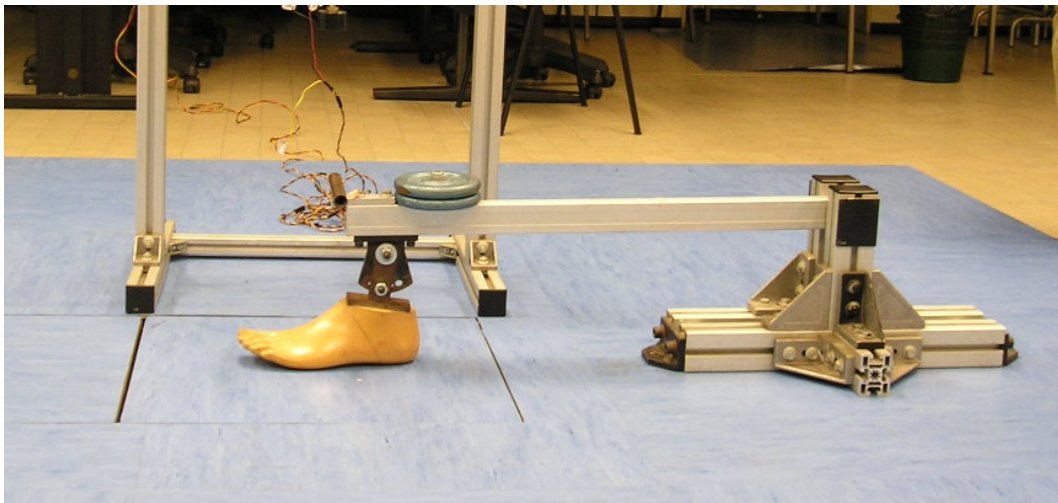


Figura 26: la struttura di simulazione impatti è stata schematizzata nel modello computazionale mantenendo i soli dettagli dimensionali essenziali a garantire compatibilità cinematica tra l'IS fisico e la sua controparte virtuale. Tale strategia modellistica è stata adottata per ragioni di semplicità. Tutte le lunghezze riportate sono espresse in mm.



Le geometrie di simulatore e suola sono state accostate; la pedana di forza, superficie d'impatto nei *trial* sperimentali, è stata modellata attraverso un parallelepipedo (*ground-pad*) di dimensioni 100×100×20 mm.

In figura è rappresentato il modello geometrico completo di ogni dettaglio (Figura 27).

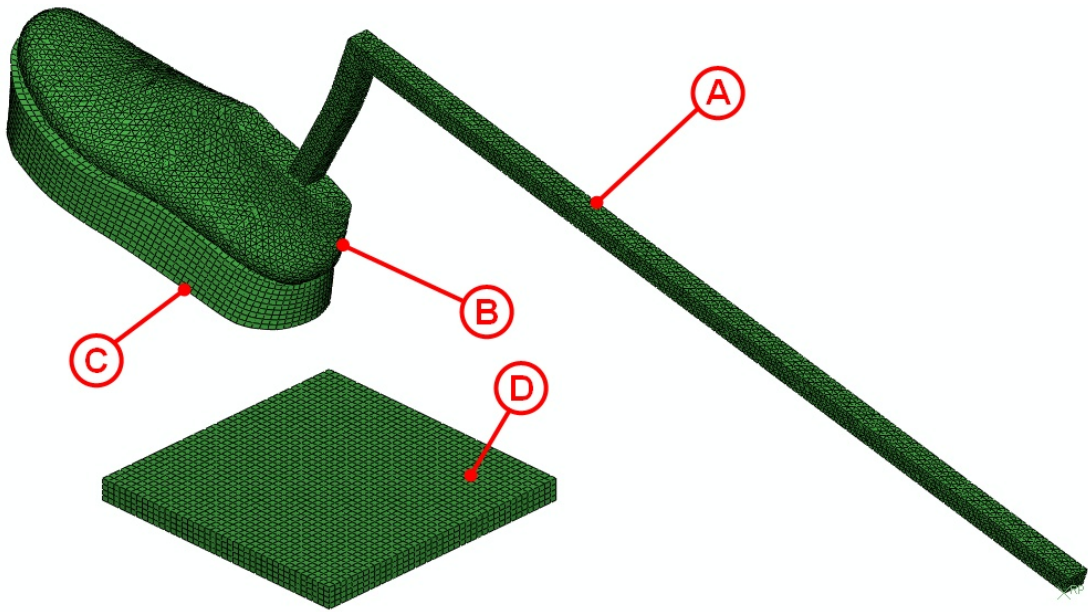


Figura 27: il modello geometrico dell'IS implementato nelle simulazioni computazionali. Si individuano facilmente i quattro sottoelementi che lo compongono: (A) il braccio di leva del simulatore, semplificato rispetto al reale ma dimensionalmente rigoroso; (B) la terminazione pediforme e (C) la suola, entrambe ricostruite a partire da scansioni laser; (D) il parallelepipedo rappresentativo della piattaforma dinamometrica in corrispondenza della quale avviene l'impatto.

Dal momento che il grado di conformità della suola gioca un ruolo importante nei fenomeni di interesse (vedi Paragrafo 1.3, “Studi precedenti”), per ottenere un modello verosimile di *midsole* più congruente alla geometria dell'estremità, la deformata della suola alla fine del primo *step* (vedi Paragrafo 2.3.2, “Modellazione numerica”) di una simulazione tentativo è stata assunta in qualità di configurazione indeformata nel modello finale.

## 2.3.2 Modellazione numerica

Di seguito vengono riportati dettagli fondamentali per la simulazione, ovvero la definizione dei materiali e delle risposte meccaniche associate, la prescrizione delle interazioni di contatto e delle condizioni al contorno.

### **Proprietà meccaniche dei materiali.**

Il simulatore di impatti è stato assunto perfettamente rigido in quanto caratterizzato da una rigidità superiore di diversi ordini di grandezza rispetto a quella degli altri materiali presenti nel modello: le deformazioni a suo carico non sono pertanto apprezzabili. In aggiunta, il presente studio non ha alcun interesse a valutare grandezze interne alla struttura dell'IS.

Questo accorgimento ha permesso di contenere il costo complessivo della simulazione.

Il *ground-pad* è stato modellato con le proprietà dell'acciaio: la risposta meccanica del materiale è stata definita con un legame costitutivo omogeneo, elastico, lineare ed isotropo (modulo di Young  $E = 205$  GPa; coefficiente di Poisson  $\nu = 0.29$ ) e per la densità è stato adottato il valore  $\rho = 7.85$  g/cm<sup>3</sup> (AISI 4000 Steel, <http://www.matweb.com>).

La suola è stata caratterizzata omogeneamente come schiuma di EVA di densità  $\rho = 0.17$  g/cm<sup>3</sup> (Verdejo e Mills, 2004); la sua risposta meccanica non lineare, elastica ed isotropa è stata modellata grazie ad una funzione di energia di deformazione del secondo ordine tipica per le iperschiume (Ogden, 1972)

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left[ (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) + \frac{1}{\beta_i} ((J^{el})^{-\alpha_i \beta_i} - 1) \right]$$

dove:

- N è l'ordine della funzione;
- i termini  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  e  $\lambda_3$  rappresentano la componente deviatorica degli allungamenti principali del materiale;
- $\mu_i$ ,  $\alpha_i$  e  $\beta_i$  sono parametri caratteristici del materiale dipendenti dalla temperatura;
- i coefficienti  $\mu_i$  sono correlati con il modulo di scorrimento (*shear modulus*)

iniziale tramite la relazione  $\mu_0 = \sum_{i=1}^N \mu_i$  ;

- i coefficienti  $\beta_i$  sono correlati al grado di comprimibilità del materiale e dipendenti

dal coefficiente di Poisson secondo la relazione  $\beta_i = \frac{\nu_i}{1-2\nu_i}$  ;

- $\mu_i$  e  $\beta_i$  consentono di identificare la resistenza alla compressione uniforme (*bulk*

*modulus*) del materiale secondo l'equazione  $K_0 = \sum_{i=1}^N 2\mu_i \left( \frac{1}{3} + \beta_i \right)$  .

Coerentemente con quanto riportato in letteratura (Verdejo e Mills, 2004), per i parametri  $\mu_1$ ,  $\alpha_1$ ,  $\mu_2$ ,  $\alpha_2$ ,  $\nu_1$  e  $\nu_2$  sono stati adottati valori pari a 1 MPa, 10, 0.05 MPa, -4, 0 e 0.4, rispettivamente.

Avendo adottato un sistema di unità di misura [mm – N – s], tutte le grandezze sopra riportate sono state riesprese in unità consistenti.

### **Interazioni di contatto.**

Per consentire al codice di riconoscere e gestire opportunamente le interazioni piede – *midsole* e *midsole* – suolo è stato fatto uso dell'algoritmo di contatto cinematico *surface-to-surface*:

- per l'interazione piede – *midsole* è stata esclusa ogni possibilità di movimento tangenziale tra i due corpi tramite l'assegnazione di un coefficiente di attrito infinito; in aggiunta, per simulare il vincolo della tomaia, non è stata ammessa la separazione delle due geometrie una volta entrate in contatto;

- all'interazione *midsole* – suolo è stato assegnato un coefficiente di attrito pari a 0.75 (Mills e Gillchrist, 2000); nessuna ulteriore restrizione cinematica è stata applicata.

### **Condizioni al contorno.**

Le simulazioni numeriche relative alle due casistiche di massa addizionale sono state organizzate in due fasi (*step*) successive.

Durante la prima ( $\Delta t_{\text{STEP}_1} = 0.1$  s) viene forzato il contatto tra *midsole* e *foot-last* applicando una pressione di 1 kPa sulla superficie inferiore della suola; ogni grado di libertà per il modello del simulatore viene temporaneamente soppresso. Così facendo si vuole garantire quell'adesione tra simulatore e *midsole* indotta nella realtà dalla tomaia ed ottenere la configurazione del sistema per lo *step* successivo.

Nel secondo *step* sono state applicate le condizioni al contorno per riprodurre il movimento rotatorio del braccio dell'IS così come catturato sperimentalmente.

A tale scopo, le curve per il controllo della cinematica del simulatore sono state costruite ricombinando le traiettorie dei *marker* rifrangenti (vedi Paragrafo 2.2.4, “Acquisizione di cinematica e cinetica”) in modo da identificare l'angolo di beccheggio del braccio dell'IS rispetto al suolo in funzione del tempo. A queste nuove tracce cinematiche è stato applicato uno schema centrato di derivazione discreta per ottenere curve di velocità angolare ( $\omega$ ), usate come condizione al contorno nelle simulazioni numeriche.

Gli andamenti  $\omega(t)$ , limitati alla finestra temporale di primo impatto, sono stati identificati per tutte le prove (Grafico 1).

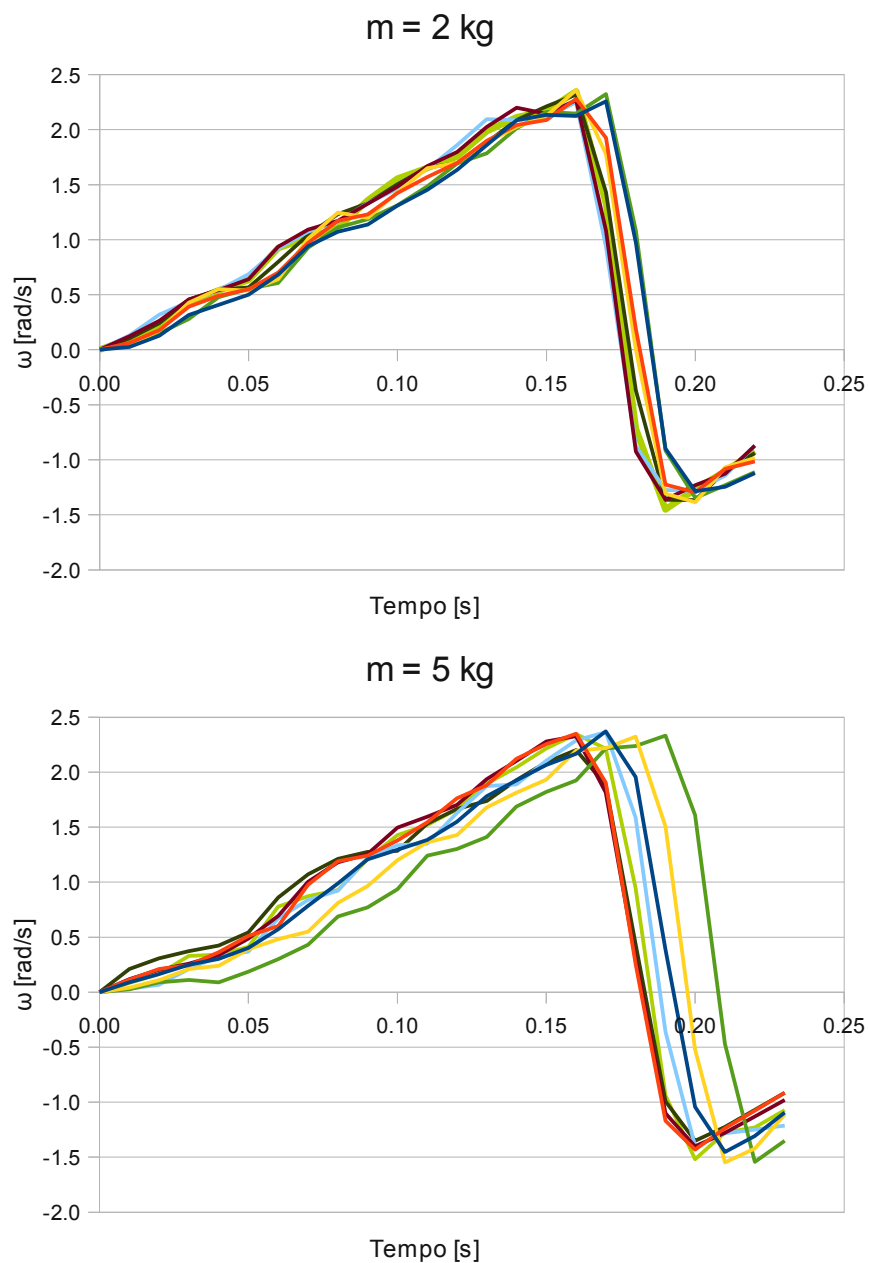


Grafico 1: velocità angolari di caduta del braccio dell'IS per i 16 *trial* acquisiti, suddivisi nelle due casistiche di massa aggiuntiva. Per  $m = 2$  kg la dispersione delle curve è contenuta mentre nel caso  $m = 5$  kg questo fattore è più significativo: tale manifestazione è probabilmente una conseguenza dell'intervento manuale necessario ad assistere l'elettrocalamita nella sospensione dell'apparato di simulazione per  $m = 5$  kg.

Per entrambe le casistiche di massa aggiuntiva si è preferito adottare una media temporale dei tracciati di  $\omega$  contestuali come condizioni al contorno definitive.

Ogni altro grado di libertà per il modello virtuale del simulatore è stato annullato ed i nodi appartenenti alla superficie inferiore del *ground-pad* sono stati vincolati.

Infine, per beneficiare di una maggiore risoluzione per le grandezze di interesse, nella finestra temporale di impatto è stato imposto un campionamento delle variabili a 1 kHz.

### 2.3.3 Studio di sensitività

Sul modello è stata condotta una preliminare analisi di sensitività finalizzata ad identificare morfologia e dimensioni ottimali dell'elemento geometrico con cui discretizzare il volume rappresentativo della suola.

Contestualmente alla morfologia, sono state considerate due possibili alternative:

- elementi tetraedrici lineari a quattro nodi (identificativo Abaqus: C3D4);
- elementi esaedrici lineari ad otto nodi (identificativo Abaqus: C3D8).

Per entrambe le tipologie di elemento sono state contemplate griglie di calcolo (*mesh*) con dimensione caratteristica pari a 3.5 e 5 mm, ottenendo in definitiva quattro casistiche di discretizzazione.

Per questi quattro casi sono state implementate le corrispondenti simulazioni di impatto in condizioni statiche, al fine di identificare l'alternativa più appropriata sulla base della qualità dei risultati e del buon senso.

La tabella seguente illustra le distribuzioni di deformazione nominale in direzione verticale ottenute da tali simulazioni (Tabella 11). Le immagini sono state catturate nell'istante di massima compressione.

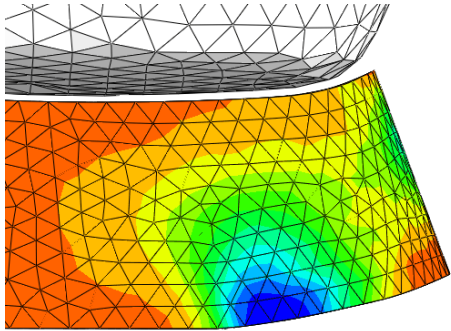
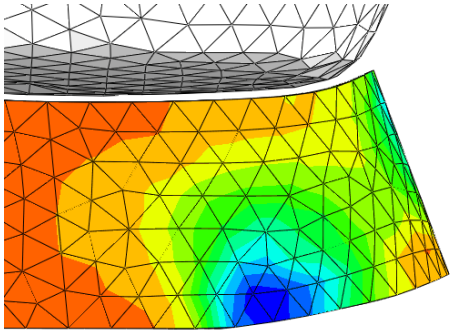
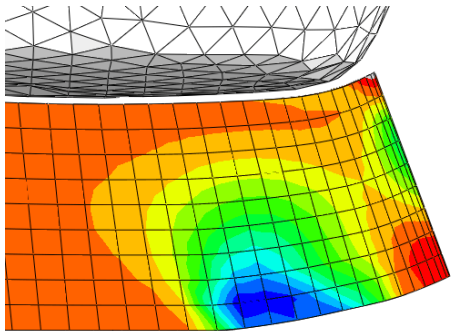
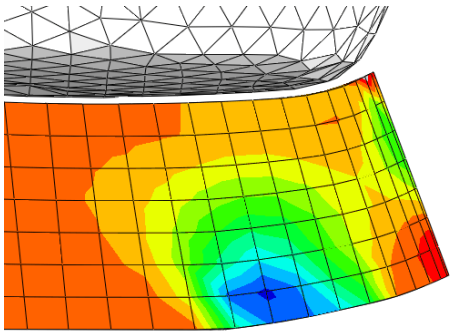
Morfologia	Lunghezza caratteristica di spigolo [mm]	
	3.5	5.0
Tetraedrica		
Esaedrica		

Tabella 11: istantanee della suola nell'istante di massima compressione per le quattro discretizzazioni contemplate nello studio di sensitività. La mappa colorimetrica mostra la distribuzione della componente di deformazione nominale in direzione verticale ( $NE_{22}$ ) sulla geometria della *midsole* in configurazione indeformata.

In funzione di questi risultati e considerando che la *mesh* tetraedrica è tipicamente associata ad una qualità informativa inferiore, per la discretizzazione sono stati preferiti gli elementi esaedrici in virtù di una maggiore regolarità nel *pattern* deformativo. Inoltre, a parità di dimensioni del volume da discretizzare gli esaedri utilizzano un minor numero di elementi rispetto ai tetraedri, consentendo un sensibile risparmio computazionale.

Si ricorda infatti che

$$\text{COSTO COMPUTAZIONALE} \propto n^\alpha$$

dove:



- $n$  è il numero complessivo di elementi;
- $2 < \alpha < 3$ .

In relazione al parametro dimensionale la discretizzazione con spigolo pari a 5 mm sembra restituire *output* a risoluzione spaziale inferiore, conseguenza di una griglia di calcolo poco fitta. Tuttavia la differenza quantitativa per la variabile considerata rispetto alla casistica con  $l_{\text{CARATTERISTICA}} = 3.5 \text{ mm}$  non è stata giudicata significativa.

Sulla base di queste considerazioni e tenendo presenti i principi base per la minimizzazione del costo computazionale, nelle simulazioni definitive al modello della suola è stata applicata una *mesh* di elementi esaedrici con spigolo di 5 mm per un numero complessivo di 5775 elementi.

La stessa discretizzazione è stata adottata per il *ground-pad* (6400 elementi); il modello dell'IS è stato invece suddiviso in tetraedri (56397 elementi): tale scelta è stata imposta dalla geometria non regolare del *foot-last*, difficilmente discretizzabile con elementi cubici poco distorti.

Le simulazioni FE così impostate mostrano un significativo grado di complessità, sia per la geometria dei modelli coinvolti sia per l'inclusione di molteplici forme di non linearità (costitutiva, cinematica, di contatto).

Le due simulazioni per i casi di massa addizionale considerati sono state portate a termine sulla medesima macchina:

- CPU: Intel® Xeon™ 2.33 GHz Core2 Quad
- RAM: 8160 MB
- HDD: 244 GB
- Linux kernel: 2.6.9-67.0.15.ELsmp
- OS: Red Hat 3.4.6-9
- Abaqus: v.6.8-1

A simulazioni concluse, come risultato di principale interesse è stata richiamata la variabile di deformazione nominale (*nominal strain*, NE) a carico della *midsole*, il cui tensore è matematicamente definito come

$$NE = \sqrt{F \cdot F^T} - I = \sum_{i=1}^3 (\lambda_i - 1) \cdot n_i n_i^T$$

dove:

- F rappresenta il tensore gradiente di deformazione;
- I è la matrice identità;
- $\lambda_i$  sono gli allungamenti lungo le direzioni principali;
- $n_i$  è il versore associato alle direzioni principali di allungamento in configurazione corrente.

Dell'intero tensore è stata presa in considerazione la sola componente  $NE_{22}$ , relativa alle deformazioni lungo una direzione normale al terreno.

Ai fini del confronto tra risultati sperimentali e previsioni computazionali propedeutico alla validazione della metodologia, il contributo delle altre componenti principali di deformazione è stato infatti trascurato:

- la focalizzazione dello studio sulle proprietà di *shock absorption* ha autorizzato a trascurare la componente  $NE_{11}$  (deformazione nominale lungo l'asse anteroposteriore) in quanto il fenomeno di assorbimento dinamico si manifesta prevalentemente lungo la normale al terreno;
- l'acquisizione ottica degli impatti sperimentali a mezzo di singola HS DC (vedi Paragrafo 2.2.3, "Acquisizioni ottiche ad alta frequenza") ha permesso di valutare la deformazione superficiale a carico della *midsole* con una distribuzione obbligatoriamente piana. La mancanza dati sperimentali per la componente  $NE_{33}$  (deformazione nominale lungo l'asse ottico della telecamera) ha giustificato l'assenza di una discussione su tale componente.

In conclusione, il confronto tra la componente deformativa  $NE_{22}$  ottenuta dalla FEA e la

corrispondente distribuzione di deformazione calcolata sulle acquisizioni video di una realizzazione campione (vedi Paragrafo 3.2, “Deformazioni superficiali”) ha costituito il fulcro di validazione per la metodologia di indagine.

# Capitolo 3

## RISULTATI

In questo capitolo vengono esposti i risultati funzionali alla validazione del metodo, oltre ad una discussione degli stessi.

## 3.1 Massa efficace

Il calcolo di massa efficace nei due casi di carico addizionale ha restituito:

- per  $m = 2$  kg,  $M_{\text{EFF}} = 4.62 \pm 1.03$  kg;
- per  $m = 5$  kg,  $M_{\text{EFF}} = 6.24 \pm 0.77$  kg.

Questi risultati sono superiori rispetto ai valori riscontrati in letteratura (Ker et al., 1989; Chi e Schmitt, 2005) pertanto il collegamento ad analoghe indagini sperimentali in vivo è debole. Si è tuttavia consapevoli della difficoltà a verificare un confronto puntuale in quanto  $M_{\text{EFF}}$  è un parametro di sintesi influenzato da numerosi fattori, tra cui velocità dell'andatura, stile di corsa e, contestualmente ai test di impatto realizzati, proprietà della forma su cui è stata indossata la calzatura.

I valori ritrovati nella sperimentazione suggeriscono le seguenti conclusioni:

- la massa del soggetto medio ipoteticamente associato alle repliche artificiali di impatto è superiore rispetto alla massa media dei soggetti indagati in letteratura;
- per migliorare la confrontabilità si potrebbero applicare differenti configurazioni di carico aggiuntivo, modificandone la massa ed il braccio associato;
- in alternativa si potrebbe correggere il parametro  $h$ , altezza iniziale dell'apparato prima dello sgancio.

La potenziale efficacia di quest'ultima modifica è suggerita anche dal confronto tra le componenti verticali di velocità del *foot-last* ( $v_{\text{FOOT-LAST}}$ ) all'istante di impatto. In entrambe le casistiche di carico addizionale tale componente di velocità risulta superiore a quanto riportato in letteratura ( $v_{\text{FOOT-LAST}} = 0.72 \pm 0.27$  ms<sup>-1</sup> per Chi e Schmitt, 2005):

- per  $m = 2$  kg,  $v_{\text{FOOT-LAST}} = 1.51 \pm 0.12$  ms<sup>-1</sup>;
- per  $m = 5$  kg,  $v_{\text{FOOT-LAST}} = 1.64 \pm 0.10$  ms<sup>-1</sup>.

Se da un lato i risultati di massa efficace rimarcano la difficoltà nello stabilire relazioni con

altri studi, dall'altro la ridotta dispersione delle misure di velocità conferma la ripetibilità degli eventi associata all'utilizzo di un IS.

Ai fini del lavoro intrapreso l'analisi di massa efficace ed il relativo confronto con la letteratura specializzata ha comunque costituito un risultato accessorio ed auspicabile ma senza dubbio non necessario alla validazione della metodologia di indagine.

## 3.2 Deformazioni superficiali

Il cuore della validazione resta quindi ancorato all'analisi delle deformazioni superficiali a carico della suola: nelle tabelle sottostanti viene proposto il confronto qualito-quantitativo tra i risultati sperimentali (analisi video) e le previsioni numeriche (analisi FE) della componente  $NE_{22}$  di deformazione in un intorno dell'istante di massima compressione per la *midsole*. Questi risultati vengono presentati a mezzo di mappe colorimetriche suddivise per casistica di appartenenza ( $m = 2$  kg e  $m = 5$  kg); in tutte le mappe di distribuzione la scala colorimetrica condivide gli stessi estremi (**MIN** = -0.2362; **MAX** = 0.01).

Nel caso  $m = 2$  kg (Tabella 12) si nota compatibilità tra i risultati dell'analisi video e quelli rintracciati con l'analisi computazionale, principalmente in relazione allo sviluppo della deformazione nel tempo. Si evidenzia tuttavia un netto divario in intensità tra le due distribuzioni nella porzione inferiore destra della ROI corrispondente all'area del retro suola: mentre la previsione computazionale mostra una piccola area sottoposta a regime di compressione, questa manifestazione è assente nelle mappe valutate sulle acquisizioni sperimentali.

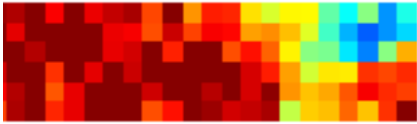
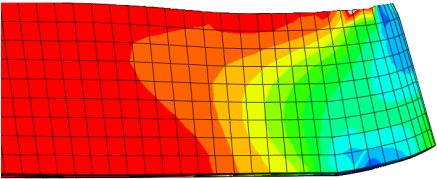

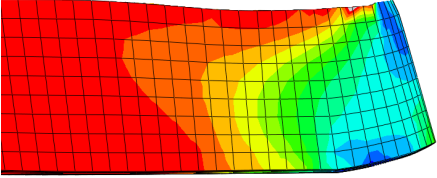
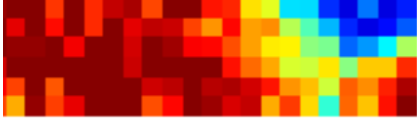
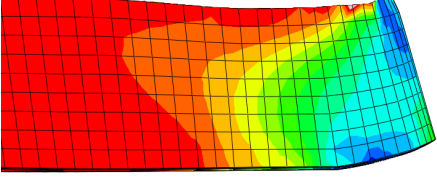
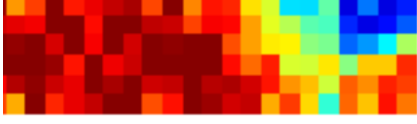
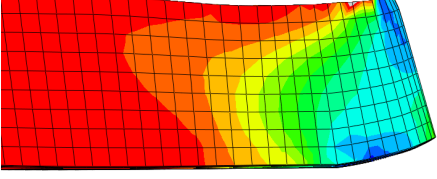
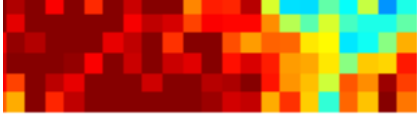
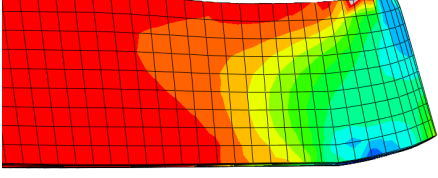
m = 2 kg			
t	frame	Analisi video	Analisi FE
t <sub>MC</sub> -3 ms	-4		
t <sub>MC</sub> -1 ms	-1		
t <sub>MAX COMPR</sub>	0		
t <sub>MC</sub> +1 ms	+1		
t <sub>MC</sub> +3 ms	+4		

Tabella 12: confronto tra deformazioni superficiali ottenute sperimentalmente e simulate al calcolatore per m = 2 kg. L'accoppiamento temporale tra i dati, caratterizzati da frequenze di campionamento leggermente differenti ( $f_{HS\ DC} = 1.2\text{ kHz}$ ;  $f_{FEA} = 1.0\text{ kHz}$ ), è stato conseguito appaiando i risultati in corrispondenza dell'istante di massima compressione; in seguito, il confronto è stato esteso nel tempo adottando salti temporali compatibili con i *frame* a disposizione.

Per m = 5 kg (Tabella 13) l'analisi video restituisce un valore di massima compressione in corrispondenza del tallone, con evidente sovrastima della deformazione in questa specifica regione. Tale risultato è la conseguenza dell'incompatibilità prospettica di un singolo dispositivo di acquisizione ottica con il reale movimento dei *marker* che, a causa di rigonfiamenti laterali (*bulging*) della suola, subiscono spostamenti lungo la direzione



dell'asse ottico della telecamera.

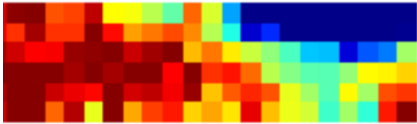
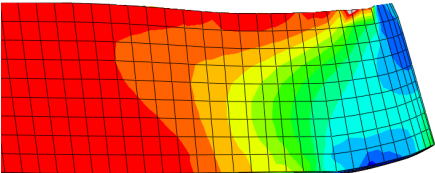
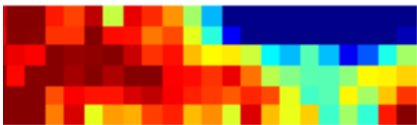
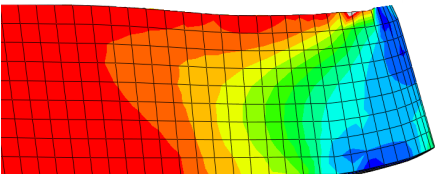
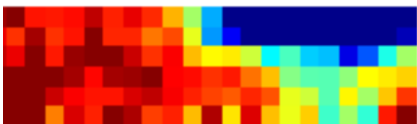
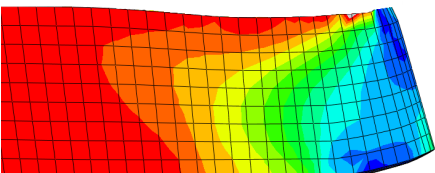
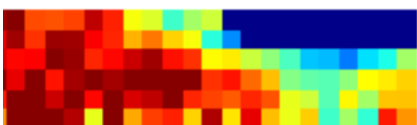
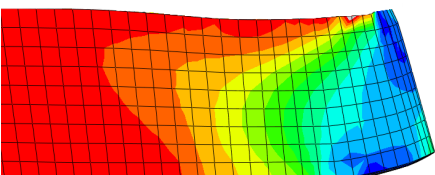
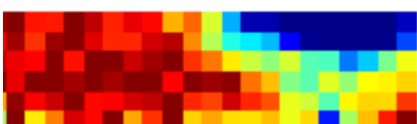
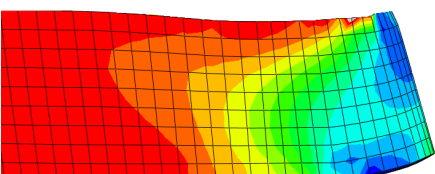
$m = 5 \text{ kg}$			
$t$	<i>frame</i>	Analisi video	Analisi FE
$t_{MC} - 3 \text{ ms}$	-4		
$t_{MC} - 1 \text{ ms}$	-1		
$t_{MAX \text{ COMPR}}$	0		
$t_{MC} + 1 \text{ ms}$	+1		
$t_{MC} + 3 \text{ ms}$	+4		

Tabella 13: confronto tra deformazioni superficiali ottenute sperimentalmente e simulate al calcolatore per  $m = 5 \text{ kg}$ . L'approccio utilizzato per accoppiare nel tempo i dati è il medesimo illustrato in precedenza.

Sebbene le mappe di deformazione non mostrino una corrispondenza puntuale tra risultati sperimentalmente e computazionali e pertanto non si possa parlare propriamente di validazione, l'esito finale è comunque incoraggiante: la previsione numerica è in grado di riprodurre, anche se in termini grossolani, la distribuzione di deformazione ottenuta sperimentalmente. Non si esclude che ulteriori sviluppi della procedura di indagine, volti sia al miglioramento

del comparto di acquisizione per un'adeguata ricostruzione stereofotogrammetrica del movimento dei *marker* ottici, sia alla correzione delle geometrie virtuali tramite *file* CAD, possa portare a risultati significativamente migliori e propedeutici ad una validazione rigorosa.

### 3.3 Carichi al terreno

Per arricchire la validazione del metodo sono stati indagati gli andamenti della reazione vincolare al terreno nel tempo: le misure sperimentali registrate dalla piattaforma dinamometrica sono state comparate alle reazioni nodali previste dal codice numerico.

Il simulatore di impatti impiegato nella sperimentazione è stato progettato in modo tale che la traiettoria del braccio di leva all'impatto fosse assimilabile alla perpendicolare al suolo (vedi Paragrafo 2.2.2, “Sistema sperimentale di simulazione impatti”): questo accorgimento costruttivo ha ridotto al minimo le sollecitazioni anteroposteriori e mediolaterali negli impatti, consentendo di focalizzare il confronto sulla sola componente verticale di GRF.

I risultati di questa indagine vengono proposti di seguito sotto forma rappresentazioni grafiche (Grafico 2) per consentirne un raffronto visivo immediato.

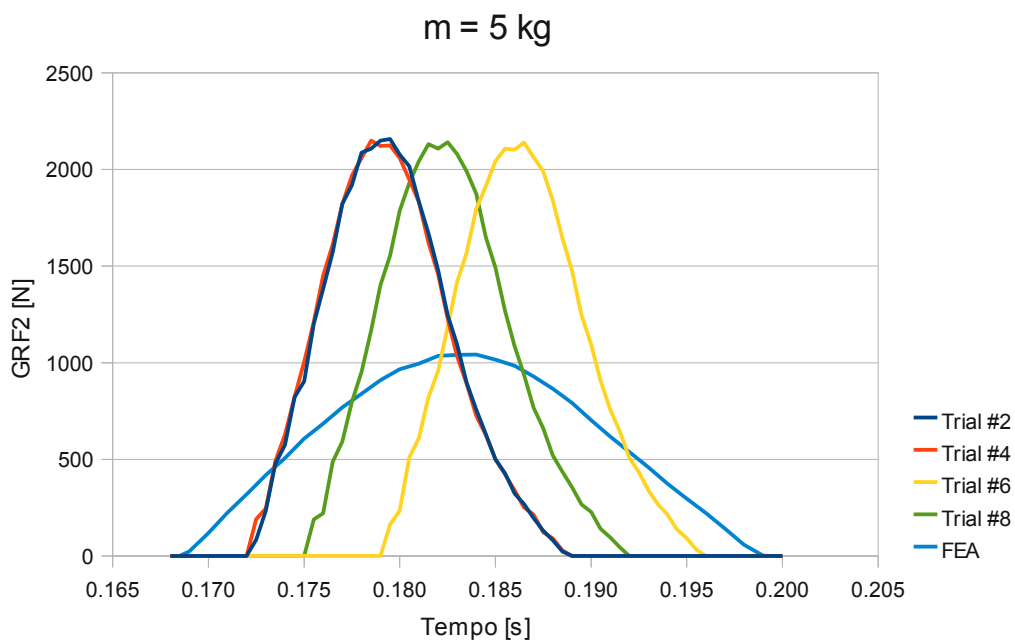
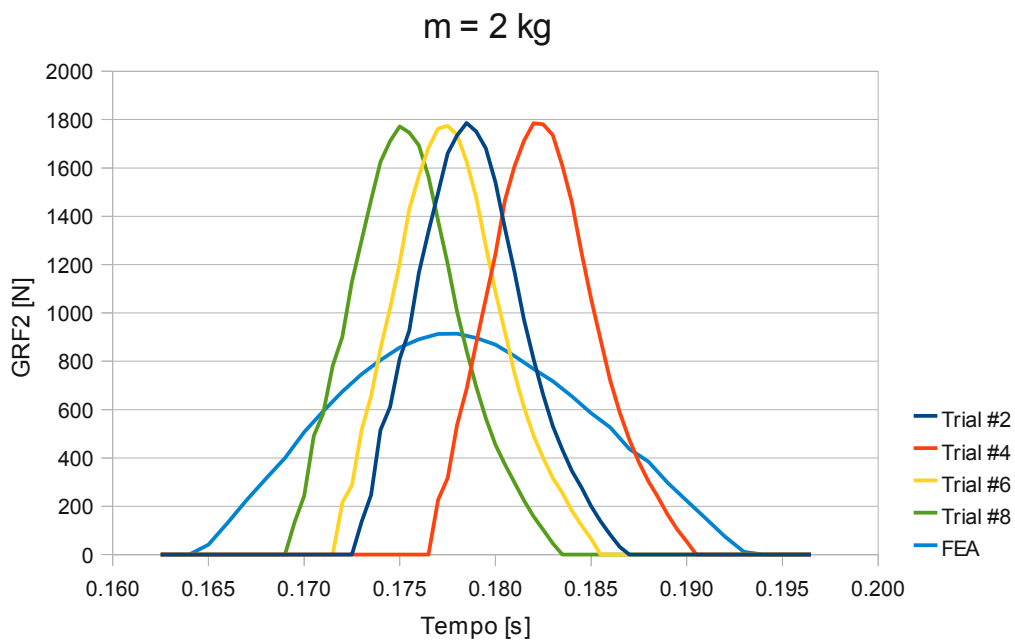


Grafico 2: rilevazioni cinetiche (componente verticale) ottenute dalla piattaforma di forza ( $f_{\text{DYN}} = 2 \text{ kHz}$ ) e le corrispondenti grandezze valutate nelle simulazioni numeriche ( $f_{\text{FEA}} = 1 \text{ kHz}$ ) per le due casistiche di massa aggiuntiva.  $t = 0 \text{ s}$  coincide con l'istante di disinnescamento dell'elettrocalamita.

In entrambe le casistiche, il profilo temporale della GRF numerica (curva azzurra) presenta un picco massimo dimezzato (914 N per  $m = 2 \text{ kg}$ ; 1042 N per  $m = 5 \text{ kg}$ ) ed una durata

quasi doppia (31 ms in entrambe le condizioni di carico) rispetto alle corrispondenti grandezze misurate nelle sessioni sperimentali ( $GRF2_{MAX} = 1779.04 \pm 7.31$  N e  $\Delta t = 14.25 \pm 0.29$  ms per  $m = 2$  kg;  $GRF2_{MAX} = 2146.16 \pm 8.17$  N e  $\Delta t = 17.00 \pm 0.0$  ms per  $m = 5$  kg).

Queste differenze marcate possono ammettere le seguenti interpretazioni:

- la presenza di qualche anomalia a livello delle curve di cinematica utilizzate per controllare il modello virtuale o, più a monte, nella procedura di acquisizione delle stesse. Nelle sessioni sperimentali la cinematica è stata campionata a 100 Hz, una risoluzione temporale forse troppo bassa per cogliere in modo appropriato gli eventi impulsivi nella fase di impatto. Avendo quest'ultima una durata massima di 20 ms, tali specifiche di acquisizione hanno di fatto permesso di ottenere massimo due campioni di velocità angolare utili a descrivere l'intervallo di maggior interesse: questo può aver portato ad un inadeguato controllo del modello computazionale durante la fase di impatto;
- una formulazione non accurata delle interazioni di contatto nella simulazione computazionale. Questo errore può aver portato all'estensione della durata del contatto, con un inizio anticipato ed una conclusione tardiva.

# Capitolo 4

## CONCLUSIONI

In funzione dei risultati esposti nel capitolo precedente, si giunge al bilancio finale sullo studio affrontato, ricapitolandone le limitazioni e proponendo frontiere di ulteriore espansione.

## 4.1 Validazione del metodo

Il presente studio ha avanzato i primi passi verso una nuova frontiera di analisi per le proprietà di *shock absorption* di calzature sportive basata sulla replicazione computazionale di prove standardizzate di impatto. Allo scopo è stato realizzato un modello virtuale del simulatore di impatti impiegato nei *trial* sperimentali, pilotato grazie ai tracciati cinematici acquisiti durante tali prove.

Come per ogni fenomenologia reinterpretata a mezzo di codici di calcolo numerico, si è cercato di validare l'approccio attraverso un confronto tra variabili significative previste dal calcolatore e le corrispondenti grandezze sperimentali.

Nello specifico, la deformazione superficiale a carico della suola ottenuta dalle simulazioni numeriche ha mostrato un'incoraggiante compatibilità con i risultati sperimentali associati, soprattutto in relazione alla dinamica di sviluppo e riassorbimento nel tempo. Tuttavia questo risultato non è sufficiente a permettere la sostituzione della tradizionale indagine di prototipi con quella condotta al calcolatore, nonostante quest'ultima sia più versatile: nel confronto sono state rilevate incongruenze non trascurabili nelle estensioni di aree della *midsole* soggette a compressione.

Queste anomalie assumono prioritario interesse nell'ottica di una futura integrazione e possono trovare spiegazione nei vincoli che hanno caratterizzato tanto l'acquisizione dei dati sperimentali quanto le simulazioni numeriche:

- la disponibilità di una sola telecamera per l'acquisizione video dei test sperimentali;
- l'assenza di specifiche ufficiali comodamente fruibili riguardo geometria e struttura interna della *midsole*;
- la mancanza di informazioni accurate sui materiali impiegati.

L'analisi delle reazioni vincolari al terreno ha portato ad analoghe incongruenze: le previsioni computazionali della componente verticale di GRF differiscono dai dati sperimentali sia per picco di intensità che per estensione temporale, complicando

ulteriormente il processo di validazione.

In questo caso le anomalie sono verosimilmente imputabili ad un'inadeguata risoluzione temporale delle condizioni al contorno o ad un'implementazione numerica poco accurata dei contatti.

Per quanto riguarda la massa efficace i risultati hanno mostrato una leggera sovrastima dei valori di letteratura in entrambi i casi di carico addizionale.

Al fine di potersi rapportare in modo consistente a studi di letteratura analoghi sono necessarie piccole revisioni nella configurazione del simulatore di impatti tramite modifiche della massa aggiuntiva, del braccio associato e dell'altezza iniziale.



## 4.2 Conclusioni, limiti dello studio e prossime evoluzioni

Nonostante la meticolosità incanalata nel lavoro ed i numerosi controlli in itinere, i risultati hanno restituito un bilancio finale incerto: mentre il raffronto relativo alle deformazioni di superficie sembra suggerire parziale bontà qualitativa del metodo, quello focalizzato sulla cinetica testimonia la presenza di rilevanti inaccuranze modellistiche.

Si è tuttavia inclini ad attribuire la responsabilità di questo risultato alle diverse limitazioni incontrate ed alle conseguenti ipotesi semplificative adottate. Alcune di queste, legate principalmente a restrizioni strumentali o informative, sono già state messe in luce nel corso della trattazione:

- la geometria virtuale della suola è stata ottenuta tramite rielaborazione di scansioni laser della calzatura. Questo *workflow*, obbligato dall'assenza dei *file* CAD contestuali, rappresenta un limite invalicabile oltre all'unica modalità di ricostruzione perseguibile sufficientemente accurata;
- alla *midsole* è stata assegnata una caratterizzazione omogenea in qualità di EVA ma tale descrizione è presumibilmente poco accurata. Ad ogni modo la mancanza di specifiche ufficiali al riguardo non ha permesso di sviluppare caratterizzazioni diverse da quella adottata;
- la modellazione dell'IS, nonostante la grande cura riposta in tale operazione, non può essere considerata esente da imperfezioni o minime imprecisioni dimensionali. Questo aspetto risulta ancora più enfatizzato nell'accoppiamento tra le geometrie di suola e *foot-last*;
- l'utilizzo di una singola telecamera per l'acquisizione video dei test sperimentali non ha permesso la ricostruzione stereofotogrammetrica delle posizioni occupate dai *marker* ottici durante l'impatto ed ha portato ad una descrizione esclusivamente 2D della fenomenologia deformativa, incompleta rispetto alla manifestazione reale.

In riferimento ai primi due punti è evidente come una conoscenza più approfondita della

calzatura possa favorire una modellazione più accurata della stessa: le informazioni contenute nei *file* CAD di progettazione e nelle schede tecniche relative ai materiali utilizzati garantirebbero infatti una modellazione dimensionalmente rigorosa ed una caratterizzazione meccanica altrettanto fine.

Considerazioni analoghe valgono per la modellazione dell'IS: anche in questo caso i disegni tecnici di progettazione permetterebbero di annullare minimi errori dimensionali potenzialmente presenti nel modello geometrico a causa di misure manuali. Inoltre, come sottolineato in precedenza, il modello dell'IS è stato realizzato con una geometria essenziale in virtù di una maggiore semplicità: tale strategia è legittima, ma nell'assegnazione della densità si sarebbe dovuto utilizzare un valore fittizio, ricavato dal rapporto tra peso dell'IS reale e volume del modello virtuale costruito.

Sul posizionamento relativo delle geometrie di *foot-last* e suola non si hanno validi spunti migliorativi.

Infine, il *software* di calibrazione risulta già predisposto a gestire informazioni provenienti da più gruppi di acquisizione ottica per un *tracking* stereofotogrammetrico dei *marker* applicati alla suola: una prima raffinazione dell'indagine verso maggior rigore ed accuratezza è subordinata solo alla disponibilità di un secondo dispositivo di cattura video.

Come appuntato nella discussione dei risultati, è inoltre prioritaria una revisione delle condizioni al contorno con cui è stato pilotato il modello computazionale: il campionamento della cinematica dell'IS a 100 Hz durante i test d'impatto ha sì permesso la digitalizzazione del movimento del simulatore ma con una risoluzione probabilmente troppo bassa in rapporto all'impatto campione, contraddistinto da una durata dell'ordine di decine di ms.

In aggiunta sembra opportuno introdurre nelle simulazioni computazionali un algoritmo più raffinato per la gestione dei contatti, o quantomeno dei modificatori in grado di tamponare le incongruenze messe in luce dall'analisi dei carichi al terreno.

Soddisfatti questi spunti integrativi si potrebbe nuovamente perseguire l'obiettivo di

validazione per poi concentrarsi sui seguenti sviluppi futuri:

- un aggiustamento dell'IS tale da riscontrare conformità alla letteratura per l'indice di massa efficace permetterebbe un'importante traslazione del processo validativo, passando da un confronto tra risultati di simulazione sperimentale ed *output* numerici ad un confronto tra *output* numerici e sperimentazioni in vivo;
- un'estensione dell'approccio validativo ad ulteriori modelli di calzatura permetterebbe di arricchire i risultati già conseguiti irrobustendo il paradigma di indagine;
- in seguito a risultati positivi per i precedenti punti si potrebbe iniziare a sfruttare l'interoperabilità dell'ambiente di simulazione numerica: l'integrazione di Abaqus con codici di fluidodinamica computazionale (*computational fluidodynamics*, CFD) potrebbe portare ad un'analisi accurata anche per moderne calzature sportive, in cui frequente è l'adozione di inserti di natura fluida per il potenziamento dell'aspetto di *shock absorption*.

In conclusione l'analisi affrontata necessita di integrazioni finalizzate al superamento, almeno in parte, delle limitazioni riscontrate.

Applicate le dovute rettifiche l'analisi FE dell'evento di *heel strike* si configurerebbe come uno strumento di grande potenzialità per l'indagine di impatti al suolo, in grado di fornire variabili di interesse biomeccanico ed industriale inaccessibili tramite i tradizionali metodi d'indagine.



## Bibliografia – Testi, pubblicazioni e articoli

ABAQUS Documentation v.6.7 (2007). ABAQUS, Inc. & Dassault Systèmes

Aguinaldo, A., Mahar, A., Litavish, M., Morales, A. (2002) Ground reaction forces in running shoes with two types of cushioning column systems. 2002 ISBS Conference

Bartlett, R. (2005) Future trends in sports biomechanics – reducing injury risk or improving performance? 2005 ISBS Conference

Bobbert, M.F., Yeadon, M.R., Nigg, B.M. (1992) Mechanical analysis of the landing phase in heel-toe running. *Journal of Biomechanics*, volume 25, 223-234

Brown, D.C. (1971) Close-Range Camera Calibration. *Photogrammetric Engineering*, volume 37, 855-866

Bruggermann, G.P. (2006) Biomechanical and orthopaedic concepts in athletic footwear construction. In Rainoldi, A., Minetto, M.A., Merletti, R. (Ed.), *Biomedical Engineering in Exercise and Sports*. Minerva Medica, Torino, 135-142

Cavanagh, P.R. (1980) *The running shoe book*. Mountain View, CA. Anderson World, Inc.

Cavanagh, P.R. (1990) *Biomechanics of distance running*. Human Kinetics Publishers, Champaign

Cheung, J.T.M., Luximon, A., Zhang, M. (2005) Parametrical design of foot orthosis for plantar pressure relieve based on computational modelling. 2005 FBG Conference

Cheung, J.T.M., Zhang, M. (2005) A 3-Dimensional finite element model of the human

foot and ankle for insole design. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, volume 86, issue 2, 353-358

Cheung, J.T.M., Zhang, M. (2006) Finite element modelling of the human foot and footwear. 2006 ABAQUS Users' Conference

Cheung, J.T.M., Yu, J., Wong, D.W.C., Zhang, M. (2009) Current methods in computer-aided engineering for footwear design. Footwear Science, volume 1, issue 1, 31-46

Chi, K.J., Schmitt, D. (2005) Mechanical energy and effective foot mass during impact loading of walking and running. Journal of Biomechanics, volume 38, 1387-1395

Cook, S.D., Kester, M.A., Brunet, M.E. (1985) Shock absorption characteristics of running shoes. The American Journal Of Sports Medicine, volume 13, issue 4, 248-253

Denoth, J. (1986) Load on the locomotor system and modeling. In Nigg B.M. (Ed.), Biomechanics of Running Shoes. Human Kinetics Publisher, Champaign, 78-84

Dickinson, J.A., Cook, S.D., Leinhardt, T.M. (1985) The measurement of shock waves following heel strike in running. Journal of Biomechanics, volume 18, 415-422

Dura, J.V., Alcantara, E., Rosa, D., Gamez, J., Gonzalez, J.C. (2006) Biomechanical aspects of playing surfaces and shoe-surface-interaction. In Rainoldi A., Minetto M.A., Merletti R. (Ed.), Biomedical Engineering in Exercise and Sports. Minerva Medica, Torino, 143-165

Edwards, W.B., Derrick, T.R. (2008) The influence of effective mass on impact force and acceleration. 2008 ISBS Conference

Even-Tzur, N., Weisz, E., Hirsch-Falk, Y., Gefen, A. (2006) Role of EVA viscoelastic properties in the protective performance of a sport shoe: computational studies. Bio-

Medical Materials and Engineering, volume 16, 289-299

Ferber, R., Mikin, C.Z., Devries, G. (2006) Natural posture running: a biomechanical and physiological pilot study. <http://www.nprunning.com>

Flores, M., Smith, D.R. (2004) A comparison of the cushioning effect of three top rated running shoes and a shoe using a new spring technology. 2004 ISBS Conference

Goske, S., Herdemir, A., Petre, M., Budhabhatti, S., Cavanagh, P.R. (2006) Reduction of plantar heel pressures: insole design using finite element analysis. *Journal of Biomechanics*, volume 39, 2363-2370

Gruber, K., Ruder, H., Denoth, J., Schneider, K. (1998) A comparative study of impact dynamics: wobbling mass model versus rigid body models. *Journal of Biomechanics*, volume 31, 439-444

Hamill, J., Haddad, J.M., Van Emmerik, E.A. (2006) Overuse injuries in running: do complex analysis help our understanding? *Proceedings of the XXIV International Symposium on Biomechanics in Sports* 1, 27-32

Haralick, R.M., Shapiro L.G. (1992) *Computer and Robot Vision*, volume II, Addison-Wesley, 316-317

Hennig, E.M. (2006) Biomechanics in different disciplines and factors affecting performance. In Rainoldi A., Minetto M.A., Merletti R. (Ed.), *Biomedical Engineering in Exercise and Sports*. Minerva Medica, Torino, 89-101.

Hennig, E.M. (2008) Biomechanical evaluation of running and soccer shoes: methodology and testing procedures. *Proceedings of the XXVI International Conference on Biomechanics in Sports*, Seoul National University, Seoul, Korea

Hsiao, H.W., Guan, J., Weatherly, M. (2002) Accuracy and precision of two in-shoe pressure measurement systems. *Ergonomics*, volume 45, issue 8, 537-555

Hurkmans, H., Bussmann, J., Benda, E., Verhaar, J., Stam, H. (2006) Accuracy and repeatability of the Pedar Mobile system in long-term vertical force measurements. *Gait & Posture*, volume 23, issue 1, 118-125

Ker, R.F., Bennett, M.B., Alexander, R.M., Kester, R.C. (1989) Foot strike and the properties of the human heel pad. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 203, 191-196

Lemmon, D., Shiang, T.Y., Hashmi, A., Ulbrecht, J.S., Cavanagh, P.R. (1997) The effect of insoles in therapeutic footwear – a finite element approach. *Journal of Biomechanics*, volume 30, issue 6, 615-620

Lewis, J.P. (1995) *Fast Normalized Cross-Correlation*. Industrial Light & Magic

Lewis, J.P. (1995) *Fast Template Matching*. Proceedings of Conference of Vision Interface, Quebec City, Canada

Logan, S., Hunter, I., Hopkins, J.T., Feland, J.B., Parcell, A.C. (2010) Ground reaction force differences between running shoes, racing flats, and distance spikes in runners. *Journal of Sports Science and Medicine*, volume 9, issue 1, 147-153

Marquardt, D.W. (1963) An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, volume 11, issue 2, 431-441

McClay, I. (2000) The evolution of the study of the mechanics of running – relationship to injury. *Journal of the American Podiatric Medical Association*, volume 90, issue 3, 133-148

Mills, N.J., Gilchrist, A. (2000) Modelling the indentation of low density polymer foams.



Cellular Polymers, volume 19, 389-412

Nigg, B.M., Cole, G.K., Bruggermann, G.P. (1995) Impact forces during heel toe running. *Journal of Applied Biomechanics*, volume 11, issue 4, 407-432

Nigg, B.M., Stefanyshyn, D., Cole, G., Boyer, K. (2005) Footwear research – past, present and future. *Proceedings of the 7th Symposium on Footwear Biomechanics*, Case Western Reserve University, Cleveland, USA

Nigg, B.M. (2006) New ideas and concepts in sports shoe development. 2006 ISBS Symposium

Ogden, R.W. (1972) Large deformation isotropic elasticity: on the correlation of theory and experiment for rubberlike solids, *Proceedings of the Royal Society A* 326, 565-584

Smeathers, J.E. (1989) Transient vibrations caused by heel strike. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 203, 181-186

Stackhouse, C.L., McClay Davis, I., Hamill, J. (2004) Orthotic intervention in forefoot and rearfoot strike running patterns. *Clinical Biomechanics* 19, 64-70

van Mechelen, W. (1992) Running injuries. A review of the epidemiological literature. *Sports Medicine*, volume 14, issue 5, 320-335

Verdejo, R., Mills, N.J. (2004) Heel-shoe interactions and the durability of EVA foam running shoe midsoles. *Journal of Biomechanics*, volume 37, issue 9, 1379-1386

Vicon MX Hardware System Reference v.1.4 (2006). Vicon Motion Systems Limited

Whittle, M.W. (1999) Generation and attenuation of transient impulse forces beneath the foot: a review. *Gait & Posture*, volume 10, 264-275

Zhang Z. (1999) Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Greece

## Bibliografia – Siti web

Cilea Digital Library

consultato il: 12/10/2008

disponibile all'indirizzo: <http://scienceserver.cilea.it>

Engineering Village

consultato il: 16/10/2008

disponibile all'indirizzo: <http://www.engineeringvillage2.org>

Footwear Biomechanics Group (1994 – 2009)

consultato il: 08/10/2008

disponibile all'indirizzo: <http://www.footwearbiomechanics.org/?q=node/35>

International Society of Biomechanics

consultato il: 08/10/2008

disponibile all'indirizzo: <http://www.isbweb.org/>

ISBS – Conference Proceedings Archive

consultato il: 08/10/2008

disponibile all'indirizzo: <http://w4.ub.uni-konstanz.de/cpa>

Matweb – Online Materials Information Resource (1996 – 2010)

consultato il: 27/01/2009

disponibile all'indirizzo: <http://www.matweb.com/>

Natural Posture Running (2008 – 2010)

consultato il: 27/03/2009

disponibile all'indirizzo: <http://www.nprunning.com>

Scirus

consultato il: 12/10/2008

disponibile all'indirizzo: <http://www.scirus.com>

Matlab Central File Exchange (1994 – 2010)

consultato il: 15/04/2009

disponibile agli indirizzi: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/>

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/22185>

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/22595>

Wikipedia – The free encyclopedia

consultato il: 05/07/2010

disponibile agli indirizzi: [http://en.wikipedia.org/wiki/Main\\_Page](http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Racing\\_flats](http://en.wikipedia.org/wiki/Racing_flats)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Track\\_spikes](http://en.wikipedia.org/wiki/Track_spikes)