

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA  
SEDE A CESENA**

---

**SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA CON SEDE A CESENA**

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA BIOMEDICA**

**TESI DI LAUREA**

Elaborazione di Dati e Segnali Biomedici LM

**MODELLAZIONE E FITTING DEI PARAMETRI DI SOTTOSISTEMI  
DINAMICI PER MACCHINE WELLNESS**

CANDIDATO  
Fabrizia Broglia

RELATORE:  
Prof. Mauro Ursino

CORRELATORE  
Prof.ssa Rita Stagni

Anno Accademico 2011/2012

Sessione II

## **Ringraziamenti**

Questo lavoro di tesi è stato svolto grazie all'attività di tirocinio (finalizzato alla preparazione della tesi di laurea) che si è svolto presso l'azienda Altran Italia per la durata di 4 mesi. Durante questo periodo sono stata affiancata all'ingegnere meccanico Cristiano Polini.

Ringrazio Altran Italia, il mio tutor aziendale Dario Bellatreccia e l'ing.Cristiano Polini per la loro gentilezza e disponibilità.

Un ringraziamento speciale al professor Mauro Ursino, che in questi anni è stato per me e per i miei studi un punto di riferimento importante, sempre gentilissimo e disponibile a venire incontro alle mie esigenze e ai miei problemi. A lui va tutta la mia stima e ammirazione non solo come docente e ricercatore ma anche e soprattutto come persona.

Ringrazio inoltre la professoressa Rita Stagni per il materiale e per l'aiuto fornito nella realizzazione di questo lavoro di tesi.

Un grazie anche ai miei amici Daniele Venturoli e Andrea Andreani che mi hanno aiutato nei momenti più difficili.

Dedico questo lavoro di tesi e la mia laurea in ingegneria biomedica a mia madre.

# INDICE

<u>Introduzione</u> .....	1
<u>Capitolo 1 – BIOMECCANICA DEL CAMMINO E DELLA CORSA</u> .....	4
<u>1.1 Introduzione/Cenni Storici</u> .....	4
<u>1.2 Il ciclo del passo (Gait Cycle)</u> .....	6
<u>1.3 Il centro di pressione (COP)</u> .....	9
<u>1.4 La forza di reazione al terreno (Ground Reaction Force)</u> .....	10
<u>1.5 La forza di reazione al terreno in pendenza</u> .....	18
<u>Capitolo 2 - MATERIALI E METODI DI GENERAZIONE DEI PROFILI DI FORZA</u> .....	26
<u>2.1 GRFv camminata v=1.5 m/s</u> .....	26
<u>2.2 GRFv corsa v=2.5 m/s</u> .....	33
<u>2.3 GRF antero posteriore</u> .....	37
<u>2.4 Profili in pendenza</u> .....	41
<u>Capitolo 3 - MODELLO IN SIMULINK DEL TREADMILL</u> .....	47
<u>3.1 Schema a blocchi azionamento del treadmill</u> .....	47
<u>3.2 Modellazione in Simulink</u> .....	48
<u>3.2.1 Blocco controllore e inverter</u> .....	49
<u>3.2.2 Blocco motore asincrono</u> .....	51
<u>Capitolo 4 - RISULTATI</u> .....	59
<u>4.1 Elaborazione dei profili di forza</u> .....	59
<u>4.2 Applicazione dei profili al modello in Simulink</u> .....	63

<a href="#"><u>Conclusioni</u></a> .....	71
<a href="#"><u>Bibliografia</u></a> .....	74
<a href="#"><u>Appendice</u></a> .....	76

## Introduzione

Lo scopo di questa tesi era di contribuire alla formulazione e implementazione dei dati in ingresso in un modello di “tapis roulant” (o “treadmill”) realizzato con un programma di simulazione (Simulink). Sulla base di dati sperimentali sono stati determinati, in particolare, i profili di coppia, che rappresentano le componenti delle forze che si sviluppano camminando e correndo sul tappeto.

Questo modello, poi, incorpora molte caratteristiche della “macchina treadmill”:

-un controllo della velocità dell'albero motore comprendente anche l'azione di disturbo che il controllo deve compensare, ovvero l'effetto della “pedata” umana sul tappeto (che si traduce fisicamente in una coppia frenante o accelerante all'asse della macchina elettrica);

-un modello della trasmissione meccanica tra il motore e il nastro del tappeto (dove in prima approssimazione vengono trascurati effetti dinamici particolari come l'elasticità della cinghia ed il suo tensionamento);

-l'implementazione del modello del controllo del motore asincrono a  $V/f$  costante tramite le equazioni del suo circuito equivalente.

L'obiettivo finale della realizzazione di tale modello è quello di sostituire il banco di test finora utilizzato nell'azienda ospitante, permettendo così di eliminare i costi legati alla sua gestione. Anche se, per ragioni di riservatezza richieste dall'azienda ospitante, in questa tesi non verrà fornita una descrizione dettagliata del banco di test, si può comunque descrivere in generale questo strumento.

Questo banco è costituito da un motore frenante in grado di riprodurre l'azione della “pedata” umana sul tappeto. Questa, riportata all'asse del motore del treadmill, è una coppia che dipende dal modo di camminare del soggetto, dal suo peso, dalla velocità e dalla pendenza del tappeto.

Attualmente i test vengono condotti dall'azienda ospitante applicando dei profili di coppia al banco. Questi profili di coppia vengono acquisiti in azienda in maniera pratica, e quindi molto dispendiosa, attraverso un torsionmetro applicato all'asse del motore, facendo correre sul “treadmill” soggetti di diverso peso a diverse velocità.

Il mio lavoro di tesi si è inserito proprio in questo punto del progetto, ovvero è sostanzialmente consistito nel ricreare delle simulazioni dei profili di forza in Matlab, sulla base di dati normativi desunti dalla vasta letteratura scientifica a disposizione sull'argomento, trasformandoli poi in profili

di coppia tenendo conto, anche se in maniera approssimata, della dinamica del tappeto. In questo modo i profili si sono resi confrontabili con quelli acquisiti in azienda. Questi profili di coppia verranno applicati in ingresso al modello in Simulink e pertanto si potrà avere, teoricamente, la possibilità di effettuare virtualmente infiniti test.

Lo schema a blocchi seguente sintetizza il problema in maniera più chiara:

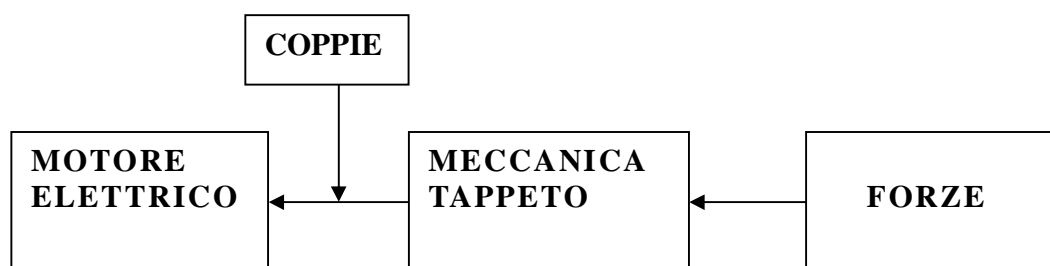


Fig.1 Schema a blocchi che sintetizza il problema affrontato in questa tesi

Questo lavoro di tesi si articola in quattro capitoli:

- un primo capitolo sulla biomeccanica del cammino e della corsa dove viene riportata la letteratura scientifica e quindi i dati normativi utilizzati per la generazione dei profili in Matlab;
- nel secondo capitolo viene descritto il metodo utilizzato in pratica per la loro generazione;
- il terzo capitolo descrive in maniera sintetica il funzionamento del treadmill e il modello in Simulink;
- nel quarto capitolo vengono elaborati i profili di forza, tenendo conto (in maniera approssimata) della dinamica del tappeto trasformandoli in profili di coppia. Qui vengono inoltre descritti i risultati ottenuti in uscita dal modello in seguito all'applicazione dei profili di coppia da me generati.

## **1. Biomeccanica del cammino e della corsa**

### ***1.1 Introduzione/Cenni Storici***

L'interesse scientifico nell'analisi della locomozione umana non è recente, anzi risale a molti secoli fa. Basta dare uno sguardo agli antichi vasi greci o agli scritti di Aristotele, che nel suo trattato “*De Motu Animalium*” (sulla locomozione degli animali), scritto nel V secolo a.C., elaborò una teoria sul movimento degli esseri viventi. Dopo una pausa nel periodo medioevale, questo interesse è ripreso con Leonardo da Vinci e altri pittori del 14esimo e 15esimo secolo che, grazie allo studio approfondito dell'anatomia (umana ed animale) hanno cercato di capire come si muovano uomini, cavalli ed altri animali per poter meglio fissare i loro movimenti nei dipinti e negli affreschi. Una descrizione dinamica della locomozione, invece, intesa come lo studio di quali siano le forze in gioco nella locomozione animale, dovrà aspettare il 17esimo secolo e l'enunciazione delle tre leggi della dinamica di Newton per essere descritta in dettaglio.

Al 1836 risale il dettagliatissimo trattato sulla camminata e la corsa nella specie umana (“*Mechanik der Menschlichen Gehwerkzeuge*”) dei fratelli Weber, Wilhelm ed Eduard. Qui si definiscono le basi per la ricerca futura e si formulano 150 ipotesi, compresa quella che il moto di un arto possa essere assimilato a quello di un pendolo.

Con lo sviluppo di nuovi mezzi, prima fotografici e poi cinematografici, comincia la maturità dello studio della locomozione animale (e umana in particolare). Tra i pionieri c'è Etienne Jules Marey (1830 – 1904), inventore anche di diversi strumenti per facilitare lo studio del movimento. Oltre ad impiegare la fotografia come un vero e proprio strumento fotogrammetrico, infatti, Marey ha progettato e costruito la prima piattaforma di forza, per misurare le forze e i momenti applicati dal piede sul terreno durante diverse andature, come la camminata e la corsa. [Novacheck, 1998]



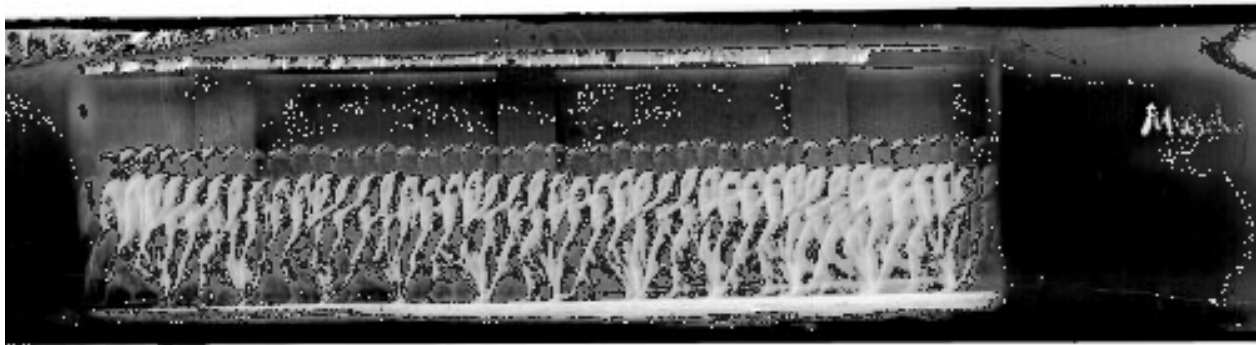


Fig. 1. Etienne-Jules Marey (1830 – 1904). Cronofotografia su lastra, negativa, di una camminata (in francese *Marche*)(1883)

L'esplosione dell'interesse nella corsa, poi, ha creato dagli anni '70 del Novecento un maggiore interesse nella ricerca e nella valutazione della biomeccanica della locomozione. Questo è stato potenziato da progressi tecnici come la disponibilità di veloci telecamere e l'utilizzo di sistemi costituiti da markers solidali con i diversi segmenti degli arti dei quali studiare il movimento, che hanno eliminato la necessità di digitalizzare a mano le riprese degli esperimenti fotogramma per fotogramma. La crescita di questo campo è stata stimolata dalla crescita della partecipazione alla corsa di fondo (come la corsa campestre) dalla fine del 1960 all'inizio del 1970. Ancora oggi circa 30 milioni di americani corrono per divertimento o competizione.

Il tasso di infortuni in questi amatori è significativo. Ogni anno tra il 25 e il 50% dei corridori subisce un infortunio abbastanza grave da provocare un cambiamento nella pratica o nelle prestazioni sportive [Hanks&Kalenak, 1990; Renstrom, 1993]. Ciò può portare il corridore a cercare consulti medici, modificare il proprio programma di allenamento o utilizzare farmaci. Le aziende di scarpe da corsa, inoltre, che hanno intravisto la possibilità di poter disporre di un nuovo, grande mercato potenziale, hanno speso parte dei loro profitti per sostenere la ricerca in biomeccanica. All'inizio, tuttavia, l'aumentata incidenza di patologie ha evidenziato la mancanza di comprensione della fisiopatologia e della biomeccanica delle malattie croniche associate alla corsa, dovute principalmente all'applicazione ripetuta di carichi relativamente piccoli applicati per molti cicli ripetuti.

## ***1.2 Il ciclo del passo (Gait Cycle)***

Il ciclo del passo (“gait cycle”) è alla base dell'analisi della locomozione (“gait analysis”) [Gage, 1990]. Questo ciclo inizia quando un piede entra in contatto con il terreno e termina quando lo stesso piede tocca nuovamente terra. Ci si riferisce a ognuno di questi momenti come “contatto iniziale” (IC). La fase di Stance (Appoggio) termina quando il piede non è più in contatto con il terreno. Il “Toe off” (TO) (“distacco delle dita”) segna l'inizio della fase di volo o di oscillazione del ciclo del passo. Ognuna di queste fasi sia per la camminata che per la corsa si suddivide ulteriormente come si vede in Fig. 2.

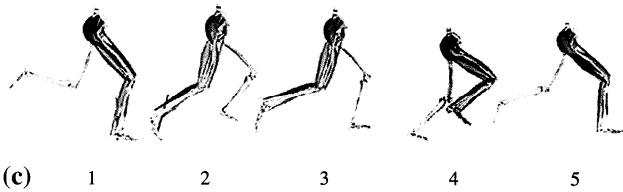
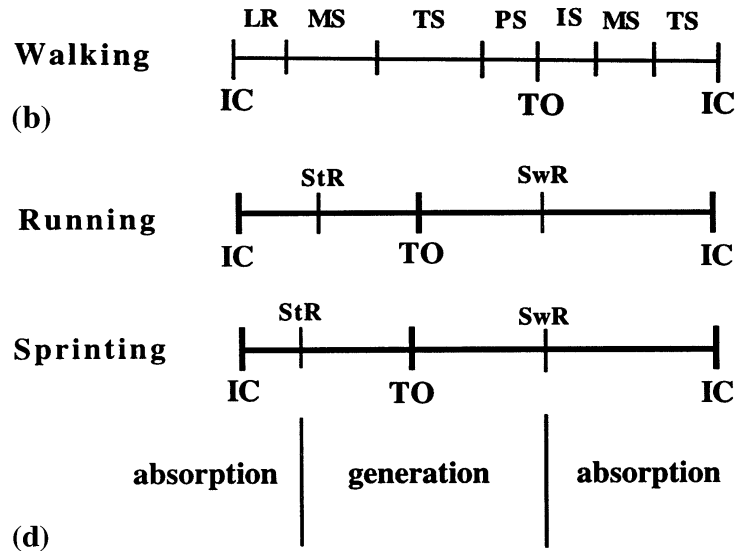
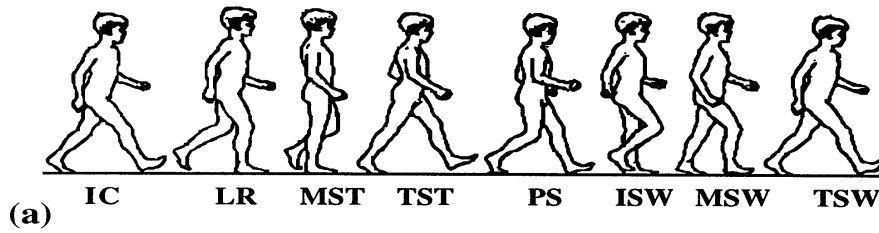


Fig.

**2a:** Figura in movimento. **2b:** Ciclo del passo: IC, contatto iniziale, TO: toe off (distacco delle dita); LR, loading response (risposta al carico); MS, midstance (fase intermedia dell'appoggio); TS, terminal stance (fase conclusiva dell'appoggio); PS, preswing (preoscillazione); IS, initial swing (oscillazione iniziale); MS, midswing (fase intermedia dell'oscillazione); TS, terminal swing (fase finale dell'oscillazione). **2c.** Figura in corsa: 1.Stance phase absorption (assorbimento della fase di appoggio), 2.Stance phase generation (generazione della fase di appoggio), 3.Swing phase generation (generazione della fase dell'oscillazione), 4.Swing phase reversal (inversione della fase dell'oscillazione), 5.Swing phase absorption (assorbimento della fase di oscillazione). \*Animazione muscolo-scheletrica prodotta impiegando il programma SIMM (Software for Musculoskeletal Modelling, Musculographics, Chicago, Illinois). **2d.** Ciclo del passo durante la corsa (running gait cycle): \*durante la corsa e lo sprint: IC, contatto iniziale; TO, toe off; StR, stance phase reversal (inversione della fase di appoggio); SwR, swing phase reversal (inversione della fase di oscillazione); assorbimento, da SwR passando per IC e terminando con StR; generazione, da StR a TO terminando con SwR.

Poiché la fase di Stance o appoggio relativa alla camminata è più lunga del 50% rispetto all'intero

ciclo del passo ci sono due periodi di doppio supporto quando entrambi i piedi sono a terra (Fig. 3), uno all'inizio e una alla fine della fase di appoggio.

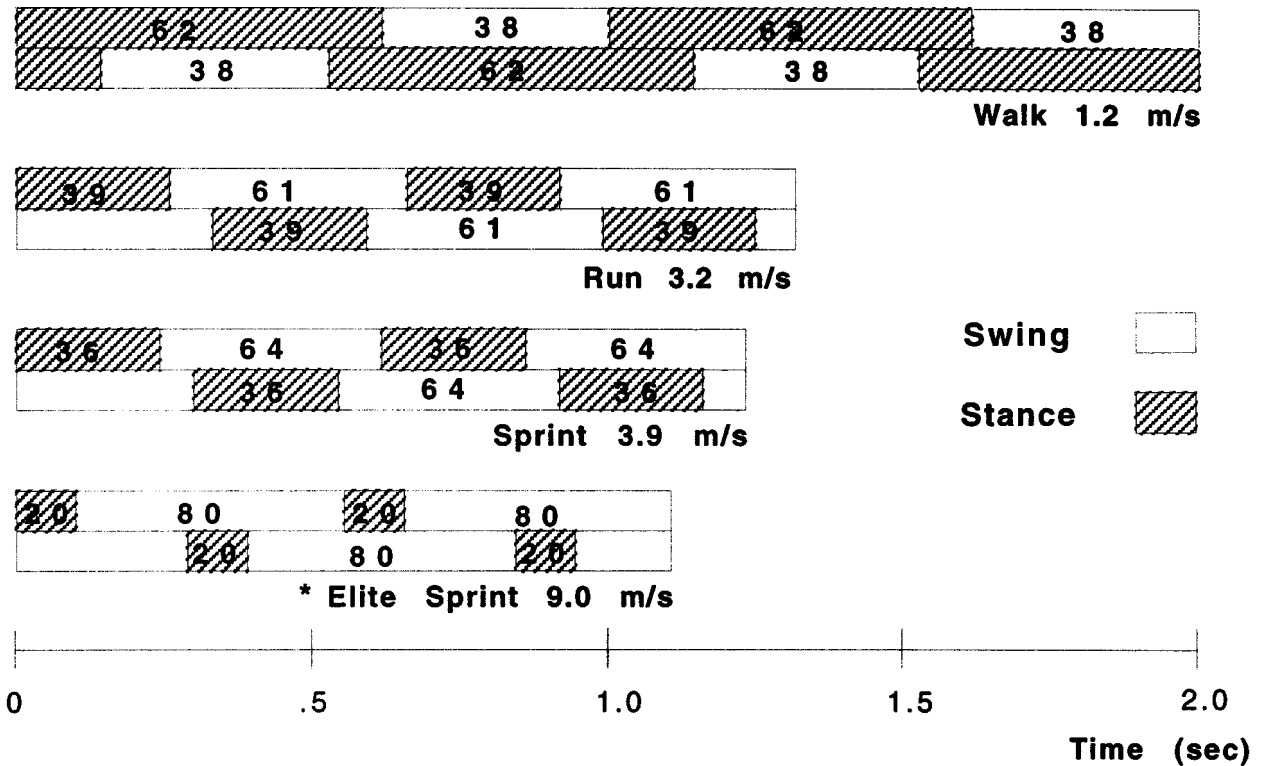


Fig.3. Variazioni nei parametri del ciclo del passo al variare della velocità di movimento. Per ogni condizione le barre del grafico iniziano a sinistra nel momento del contatto iniziale e rappresentano due cicli del passo completi o "stride". Si noti che, man mano che la velocità aumenta, il tempo speso in volo (o nell'oscillazione, indicato in chiaro) aumenta, il tempo di appoggio (stance time, indicato dalle barre tratteggiate) diminuisce, la doppia fluttuazione aumenta, e il tempo impiegato per l'intero ciclo si riduce. Le informazioni riportate in questo grafico provengono dai dati raccolti al Motion Analysis Lab del Gillette Children's Speciality Healthcare. \*Dati per gli sprinter di élite da [Vaughan, 1984].

Il cambiamento di andatura tra camminata e corsa si verifica quando i periodi di doppio supporto durante la fase di stance del ciclo del passo (entrambi i piedi sono contemporaneamente in contatto col terreno) cedono il passo a due periodi di doppia fluttuazione all'inizio e alla fine della fase di swing ("di volo") del ciclo del passo (nessun piede tocca il terreno).

Generalmente il contatto iniziale del piede cambia con la velocità: mentre a velocità più basse si appoggia inizialmente la parte posteriore del piede (il retropiede) questo punto si sposta progressivamente verso la parte anteriore (l'avampiede) all'aumentare della velocità.

Questo segna in genere la distinzione tra la corsa (running) e la corsa veloce o scatto (sprinting). Per “running” si intende la corsa che viene effettuata su lunghe distanze, la corsa di resistenza, in cui si incrementa principalmente il metabolismo aerobico (per esempio jogging, corsa campestre e maratone). Nella corsa, il toe off si verifica prima che il 50% del ciclo del passo sia completato. Non ci sono periodi in cui entrambi i piedi sono in contatto con il terreno. Al contrario, entrambi i piedi sono sollevati da terra per due volte durante la deambulazione, una all'inizio e una alla fine dell'oscillazione [Ounpuu, 1990; Novacheck, 1995], fase che è denominata di “double float”. I tempi di toe off dipendono dalla velocità. Più l'atleta si muove velocemente minore è il tempo impiegato nella fase di stance.

Nell'esperienza di Novacheck e collaboratori [Novacheck, 1995] il toe off è avvenuto al 39% del ciclo per la corsa (running) e al 36% del ciclo per lo scatto (sprinting).

I corridori e i velocisti spendono molto meno tempo nella fase di stance (Fig. 3). Per i velocisti di classe mondiale il toe off avviene già al 22% del ciclo del passo [Mann&Hagy, 1980].

Indipendentemente dalla velocità, i periodi alternati di accelerazione e decelerazione che avvengono durante la corsa sono denominati assorbimento e generazione (Fig. 2c, d). Come si vede, queste fasi non coincidono con i tempi di contatto iniziale e di stacco (toe off). Essi sono fuori fase.

Durante il periodo di assorbimento, il centro di massa del corpo si abbassa dall'altezza massima che raggiunge durante la fase denominata “double float”. Questo periodo è diviso dal contatto iniziale (IC) in assorbimento della fase di swing (Fig. 2c, caso 5) e assorbimento della fase di stance (Fig. 2C, caso1). La velocità del centro di massa diminuisce orizzontalmente durante questo periodo.

Dopo l'inversione della fase di stance, il centro di massa viene spinto verso l'alto e in avanti durante il periodo di generazione della fase di stance (Fig. 2c, caso 2). L'energia cinetica e l'energia potenziale aumentano. L'arto è poi spinto in fase di swing dopo il toe off (generazione della fase di swing – Fig. 2c, caso3). All'inversione della fase di stance (Fig. 2c, caso 4) inizia il successivo periodo di assorbimento.

### ***1.3 Il centro di Pressione (COP)***

Un metodo per la valutazione dell'applicazione della forza al piede durante la camminata e la corsa è la determinazione del centro di pressione e la mappatura della distribuzione della pressione stessa. Si è notata una notevole variabilità, soprattutto tra le persone che appoggiano il piede a metà della

sua lunghezza (mesopiede) e quelli che invece appoggiano il piede posteriormente (retropiede), chiamati rispettivamente “midfoot” e “rearfoot strikers” [Cavanagh, 1987]. La mappatura della distribuzione di pressione può essere rappresentata come si vede in fig. 4.

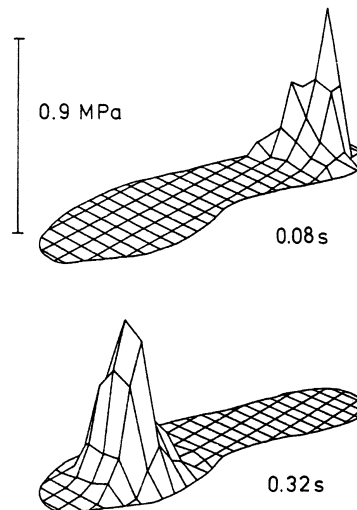


Fig. 4. Un metodo rappresentativo di mappare la distribuzione della pressione plantare. I tempi riportati in figura indicano il tempo trascorso dal momento di contatto iniziale (IC) per questo corridore che poggia al suolo prima il retropiede (rearfoot striker). Riportato da [Cavanagh, 1987]

La pressione è in genere inizialmente concentrata sul bordo laterale del tallone, poi si sposta abbastanza rapidamente verso la parte mediale dello stesso tallone e verso l'avampiede dove si evidenziano due picchi di pressione di grandezza quasi uguale sotto la prima e la seconda testa metatarsale. Naturalmente questo tipo di mappatura viene alterato in modo significativo se si indossano delle scarpe. Finché il movimento del centro di massa del corpo rimane invariato, il fatto di indossare delle scarpe non altera il valore misurato della forza di reazione al terreno. Indossare delle scarpe, tuttavia, può modificare la pressione applicata alle diverse strutture anatomiche del piede.

#### ***1.4 La forza di reazione al terreno (Ground Reaction Force)***

L'idea che vi possa essere un legame tra la forza d'impatto con il terreno e le patologie dovute alla corsa, insieme alla necessità di valutare le prestazioni degli atleti, ha indotto negli ultimi venti anni

numerosi studi sperimentali sull'andamento temporale della forza di reazione al terreno (ground reaction force, GRF). Lo studio dell'andamento nel tempo della GRF fornisce informazioni sull'ampiezza, la direzione e il punto di applicazione della forza d'impatto. In generale, la GRF ha tre componenti: verticale, antero-posteriore e medio-laterale. Se si considera la forza di impatto con il terreno, tuttavia, la componente verticale è la più rilevante e la più facile da quantificare. La componente verticale della GRF, inoltre, mostra la minore variabilità da soggetto a soggetto. Recenti studi hanno indicato che i dati caratteristici della componente verticale della GRF (o  $GRF_v$ ) come la variazione nel tempo del carico, il picco di impatto, il minimo relativo, la spinta massima e la velocità di decadimento sono dipendenti da numerosi fattori esterni, quali massa del corpo del soggetto, velocità di carico, velocità della corsa, stile di corsa, area del contatto piede-suolo oltre alle proprietà meccaniche del piede, delle scarpe indossate e dalla superficie coinvolta.

Molte ricerche precedenti hanno dimostrato che, di tutti i fattori esterni che possono influenzare la GRF, il più importante è la velocità del passo. Questi studi hanno evidenziato, infatti, che l'ampiezza della componente verticale della GRF in generale aumenta all'aumentare della velocità, ma lo studio è stato limitato a un numero ristretto di velocità relative al cammino e alla corsa e a un ristretto numero di soggetti.

L'obiettivo dello studio di Keller e collaboratori (Keller et al., 1996) è stato quello di esaminare la relazione tra la componente verticale della GRF e la velocità, considerando un ampio range di velocità di corsa fisiologiche. Ci si è posti, in particolare, le seguenti domande:

- la  $GRF_v$  aumenta in maniera lineare per velocità di corsa superiori ai 5 m/s?
- la  $GRF_v$  può variare a seconda del sesso del soggetto?
- quali effetti ha sulla  $GRF_v$  la corsa lenta o "slow jogging" (slogging) rispetto alla camminata veloce?

Per rispondere a queste domande sono stati esaminati ventitré soggetti (13 uomini e 10 donne).

Tutti erano atleti non professionisti che hanno però praticato regolarmente diverse attività sportive amatoriali come basket, squash e la sua variante racquetball, ciclismo, calcio, corsa di fondo, pallavolo, tennis, sollevamento pesi, triathlon e altri sport. Tutti erano entro il range di peso normale per la loro altezza.

La maggior parte dei soggetti considerati ha dichiarato di correre ad una velocità media di 3,0-3,4 m/s per le donne e di 3,4-3,8 m/s per gli uomini. Durante le prove i soggetti di entrambi i sessi indossavano lo stesso tipo di scarpe da corsa Nike Aircraft con soles e ammortizzazione identiche.

Ai soggetti è stato richiesto di camminare, fare jogging e correre su una piattaforma della lunghezza di 12 metri. Questo strumento permette al soggetto di avere a disposizione uno spazio di 6 m sia per accelerare che per decelerare. Una piattaforma di forza a 6 canali (modello OR6-3, Advanced Mechanical Technology. Inc., Newton, MA) con una frequenza naturale di 400 Hz è stata posta al centro della piattaforma di corsa ed è stata direttamente collegata ad un computer PDP 11/23. Un convertitore A/D a 12 bit è stato usato per campionare l'andamento della GRF nel tempo a 256 campioni al secondo. Durante la corsa fino a 6 m/s, infatti, il contenuto in frequenza del segnale GRF nel tempo non è superiore ai 50 Hz.

La superficie della piattaforma di forza misurava  $508 \times 457$  mm ed è stato delineato con un nastro giallo brillante di 25 mm di larghezza.

I soggetti sono stati sottoposti a molte prove al fine di ottenere un contatto del piede accettabile (entro i limiti della piattaforma di forza meno 25 mm su ogni lato) ed è stato loro concesso un riposo di almeno 1 min tra le varie prove di velocità. Ai soggetti è stato richiesto di iniziare il contatto con la piattaforma di forza con lo stesso piede (destro o sinistro) perché il programma di acquisizione dei dati lo richiedeva. I dati provenienti sia dai soggetti che hanno iniziato con il piede destro sia da quelli con il piede sinistro sono stati combinati in categorie di velocità distinte.

Una videocamera RGB (Hitachi, modello KP-C105A. Hitachi Ltd. Denshi Giappone) e un videoregistratore (Hitachi, modello VT-330A, Hitachi Ltd. Giappone) sono stati utilizzati per riprendere e registrare (a 30 fotogrammi al secondo) la fase di contatto iniziale del piede e il relativo angolo di contatto durante ogni prova. La fotocamera è stata posta in corrispondenza della piattaforma di forza rivolta verso la parte mediale o laterale del piede, a seconda che si sia verificato un contatto iniziale rispettivamente sinistro o destro.

Sono state misurate, per i soggetti di sesso maschile, un minimo di quattro velocità per il cammino (1,5; 2,0, 2,5 e 3 m/s) e quattro velocità per la corsa (3,5, 4,0, 5,0 e 6). I soggetti di sesso femminile sono stati esaminati alle stesse velocità di cammino e di corsa ad intervalli di 1 m/s fino alla velocità di 4,0 m/s, dopodiché gli intervalli di velocità sono stati aumentati di 0,5 m/s fino alla velocità massima del soggetto. Per ottenere l'andamento della GRF nel tempo alla massima velocità sia ai soggetti di sesso maschile che a quelli di sesso femminile è stato richiesto di correre più velocemente possibile al di sopra, rispettivamente, di 6,0 m/s e 5,0 m/s. A un sottogruppo di 12 soggetti (6 maschi e 6 femmine) è stato chiesto di fare jogging lentamente ad una velocità di 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0 m/s. Il jogging lento si distingue dalla camminata per l'assenza della fase di doppio



appoggio precedentemente descritta. Le velocità relative alla camminata, al jogging lento e alla corsa sono state misurate con due cellule fotoelettriche poste a 1 m dal centro della piattaforma di forza e montate in modo che venissero attivate dall'appoggio del soggetto. Sono state registrate fino a 10 prove per ciascuna velocità e considerate solo le prove nelle quali c'è stato un buon contatto del piede all'interno del perimetro del nastro. Inoltre sono state considerate le prove a passo costante e sono state analizzate velocità all'interno di una fascia di tolleranza di  $\pm 0,2$  m/s rispetto alle velocità sopra indicate. Come descritto in precedenza, i dati sull'andamento temporale della GRF sono stati successivamente elaborati su un computer PDP 11/73.

Le variabili principali riportate in questo articolo sono la forza massima della spinta verticale ( $F_z$ ), la massima velocità di variazione nel tempo del carico della spinta verticale ( $G_z$ ) e la velocità ( $v$ ). Al fine di determinare con precisione l'entità e la durata nel tempo della massima forza della spinta verticale è stato utilizzato un filtro con una frequenza di taglio pari a 15 Hz per realizzare lo smoothing (eliminazione dei picchi) del segnale GRF nel tempo campionato a 256 campioni al secondo. Tale operazione ha permesso di ottenere dei set di dati campionati a 65 campioni/sec ( $256/4 + 1$ ). La variazione nel tempo della frequenza di massimo carico della spinta è stata calcolata dividendo  $F_z$  per l'intervallo di tempo che intercorre tra il primo contatto del piede e il picco massimo di forza della spinta verticale. In conformità con Munro et al. [Munro et al., 1987]  $F_z$  e  $G_z$  sono state espresse come percentuali del peso corporeo del soggetto (BW).

I picchi delle forze di impatto verticali non sono stati determinati dall'andamento della GRF nel tempo, dato che questi picchi di breve durata sono stati attenuati dal procedimento di smoothing utilizzato per elaborare i dati. Questo procedimento, tuttavia, ha prodotto solamente una piccola riduzione, tra il 2 e il 5%, del picco di forza alle velocità più elevate.

Gli schemi principali di contatto del piede per ciascuna prova di ciascun soggetto sono stati quantificati esaminando immagini digitalizzate ottenute da registrazioni su videocassetta.

Gli indici di appoggio del piede (foot-strike index) cioè quale parte della superficie del piede venisse impiegata nell'appoggio (se il retro piede, il mesopiede o l'avampiede) sono stati ottenuti dalle registrazioni video dei pattern di contatto del piede.

Medie e deviazioni standard (SD) delle variabili descrittive sono state ottenute per ogni andatura: cammino, jogging lento e corsa.

L'analisi degli indici di appoggio del piede ha indicato che la maggior parte dei soggetti hanno il

loro contatto iniziale col terreno con il retro piede a velocità inferiori ai 5 m/s (figura 5).

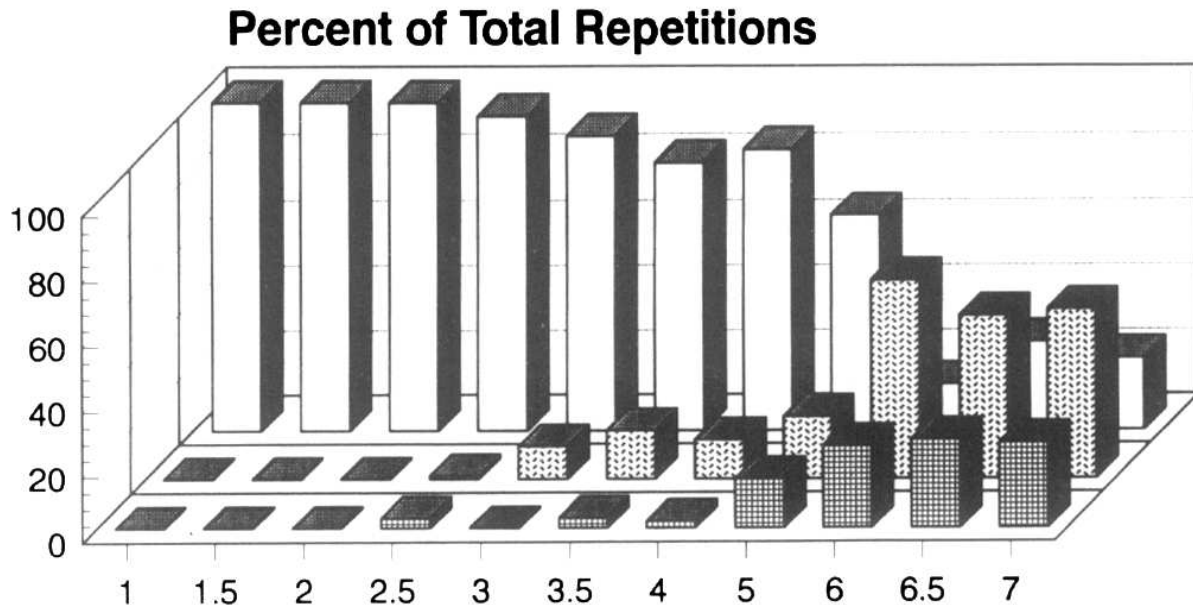


Fig. 5. Indici di appoggio del piede (retropiede, barre chiare; mesopiede, barre punteggiate; avampiede, barre tratteggiate) in funzione della velocità per tutti i soggetti studiati. Gli indici sono rappresentati in termini della percentuale delle ripetizioni totali della camminata e della corsa. A 6 m/s gli schemi di appoggio del piede cambiano da principalmente retro piede a principalmente mesopiede.

A velocità superiori a 3 m/s vi è stato un aumento del numero di soggetti che appoggiano il mesopiede o l'avampiede. L'86% dei soggetti appoggiavano sul mesopiede o sull'avampiede a 6,0 m/s.

Otto femmine hanno raggiunto una velocità di 5 m/s e due hanno completato cinque test a 6 m/s. Tutti i maschi hanno raggiunto la velocità di 6 m/s e quattro di essi hanno eseguito quattro o più prove a 7 m/s. Un soggetto di sesso maschile ha completato tre prove a 8 m/s utilizzando l'appoggio sul retro piede.

Molti soggetti hanno aumentato la falcata (la lunghezza del passo) e hanno assunto una postura più rannicchiata, sporgendosi in avanti durante le prove di corsa ad alta velocità.

L'andamento della GRF nel tempo ha evidenziato un doppio picco durante la camminata e la corsa al di sotto di una velocità di 2.5 – 3.0 m/s (figura 6). A queste velocità il picco massimo di forza di spinta è stato in genere il primo picco registrato, avvenuto tra il 15 e il 25% del tempo totale della fase di appoggio (stance). A velocità più elevate, invece, l'andamento della GRF consisteva di un singolo picco (massima spinta) situato circa al 40 – 50% del tempo di appoggio totale.

Soggetti di sesso maschile e femminile hanno valori simili di  $GRF_v$  a tutte le velocità, ed anche la relazione tra la massima forza della spinta verticale e la velocità sono simili in entrambi i sessi. Questi risultati suggeriscono, pertanto, che i dati relativi alla GRF possono essere stabiliti allo stesso modo sia per i maschi che per le femmine. Inoltre il jogging lento (o 'slogging') caratterizzato da un centro di gravità più alto e uno stile di corsa più saltellante, produce forze verticali 1,6 volte più grandi rispetto alla normale camminata alla stessa velocità o rispetto alla corsa a velocità più elevate. Lo stile di corsa, pertanto, risulta essere particolarmente importante per determinare le variabili che descrivono l'andamento nel tempo della forza di reazione al terreno.

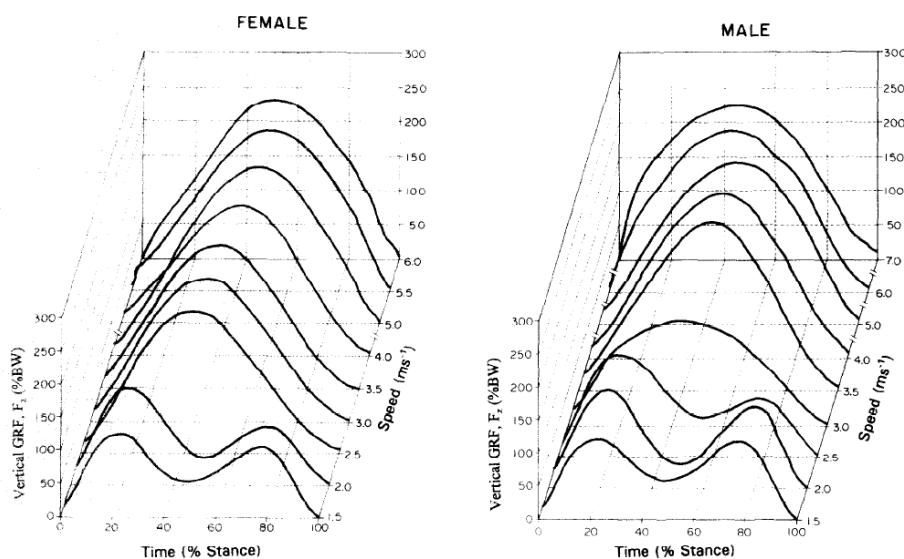


Fig. 6. Andamenti temporali della GRF verticale antero-posteriore in funzione della velocità di corsa. Gli andamenti temporali sono stati livellati (smoothed) usando un filtro intermedio a 4-poli e normalizzati come percentuale del tempo totale di appoggio secondo la procedura descritta in [Hasan et al., 1991]. I picchi di impatto non erano presenti nell'andamento della GRF verticale a causa della procedura di smoothing usata per post-processare i dati. (a) Femmine (n=7) per velocità da 1.5 a 6.0 m/s. La transizione da un doppio picco di forza a un picco singolo avveniva a 2.5 m/s. (b) Maschi (n=9) per velocità da 1.5 a 7.0 m/s. La transizione da doppio a singolo picco di forza avveniva a 3.0 m/s.

I valori medi di  $F_z$  variavano da 1,15 BW a 1,5 m/s a 2,54 BW a 4,5 m/s per le femmine, e da 1,23 BW a 1,5 m/s a 2,46 BW a 5 m/s per i maschi (Tabella 1).

La frequenza media di carico è aumentata, nel range di velocità di 1,5 a 6,0 m/s, da 7,77 a 30,0 BW/s per i soggetti di sesso femminile e da 8,20 a 29,1 BW/s per i soggetti di sesso maschile.

Il picco massimo di forza verticale aumenta in maniera lineare con la velocità fino a circa 3,5 m/s sia per i maschi che per le femmine.

Le variazioni di  $F_z$  sono più significative alle velocità di transizione tra la camminata e la corsa (per

esempio passando da 2,5 a 3 m/s), punto in cui alcuni soggetti camminano e altri fanno una sorta di jogging lento.

A 3,5 m/s le femmine corrono al 52% della loro velocità massima mentre i maschi al 67,5%.

A velocità maggiori di circa 3,5 m/s non ci sono significativi aumenti di  $F_z$  per entrambi i gruppi di soggetti. Nei maschi si è osservato un lieve calo di  $F_z$  alle più alte velocità, in particolare nei soggetti che hanno corso a 8 m/s.

La forza massima della spinta verticale e la frequenza di carico sono stati fino al 62 e al 65% più alti, rispettivamente, durante il jogging lento se confrontato con la camminata alla stessa velocità.

Le femmine hanno mostrato una minore differenza nelle forze scambiate durante il jogging lento e il cammino rispetto ai maschi. Entrambi i gruppi hanno affermato che camminare era preferibile a correre piano (fare “slogging”).

Degna di nota, inoltre, è stata la constatazione che la forza massima della spinta verticale durante la corsa a 5 – 6 m/s era maggiore di circa il 10 – 20% rispetto alla camminata. Una possibile spiegazione di questo risultato sta nel fatto che i soggetti studiati hanno adottato una postura più piegata in avanti alle velocità più elevate, in particolare durante le prove di corsa più veloci.

Uno stile di corsa sporgente in avanti, infatti, abbassa il baricentro dei soggetti e riduce la velocità verso il basso della testa, braccia e tronco, riducendo l'entità della GRF rispetto alla corsa con postura più verticale.

**Table 2.** Summary of vertical GRF variables (mean values) grouped by running speed and sex

Females			Males		
Speed ( $\pm 0.2$ m s <sup>-1</sup> )	Thrust max. force ( $F_z$ BW)	Loading rate ( $G_z$ BW s <sup>-1</sup> )	Speed ( $\pm 0.2$ m s <sup>-1</sup> )	Thrust max. force ( $F_z$ BW)	Loading rate ( $G_z$ BW s <sup>-1</sup> )
1.5 (n = 50)	1.15 (0.10)	7.77 (1.78)	1.5 (n = 65)	1.23* (0.10)	8.20 (1.84)
2.0 (n = 50)	1.36 (0.18)	11.5 (2.36)	2.0 (n = 64)	1.42* (0.14)	11.0 (2.29)
2.5 (n = 49)	1.73 (0.43)	14.6 (3.71)	2.5 (n = 65)	1.62 (0.24)	14.6 (2.46)
3.0 (n = 50)	2.11 (0.46)	16.9 (3.97)	3.0 (n = 61)	2.10 (0.50)	16.0 (3.30)
3.5 (n = 41)	2.36 (0.25)	19.1 (3.82)	3.5 (n = 37)	2.45 (0.28)	18.32 (3.36)
4.0 (n = 48)	2.33 (0.32)	19.6 (4.65)	4.0 (n = 58)	2.35 (0.48)	18.9 (4.85)
4.5 (n = 10)	2.54 (0.27)	23.7 (4.91)			
5.0 (n = 38)	2.28 (0.32)	22.3 (4.61)	5.0 (n = 60)	2.46* (0.33)	22.8 (4.51)
5.5 (n = 10)	2.13 (0.32)	22.5 (6.87)			
6.0 (n = 10)	2.45 (0.13)	30.0 (2.63)	6.0 (n = 67)	2.38 (0.28)	29.1 (15.2)
			6.5 # (n = 26)	2.34 (0.23)	37.8 (29.3)
			7.0 # (n = 17)	2.29 (0.19)	36.5 (22.5)
			8.0 # (n = 3)	1.89 (0.49)	58.5 (37.6)

sd in parentheses. n = number of trials.

\* Significant difference (ANOVA,  $P < 0.05$ ) compared to females.

# Approximate running speed across force platform since subjects were accelerating between 4 and 6 metre speed measurement interval.

Tab. 2. Sommario delle variabili della GRF verticale (valori medi) raggruppati per velocità e sesso.

Un altro dato interessante emerso da questo studio è poi che le forze che si sviluppano durante il jogging lento o “slogging” sono significativamente superiori a quelle in gioco durante la camminata. La differenza tra il cammino e lo 'slogging' è maggiore nei soggetti di sesso maschile, che hanno esibito massime forze di spinta verticale a 2,5 – 3,0 m/s, paragonabili ai valori di  $F_z$  durante la corsa a velocità tra 3 e 8 m/s.

La differenza più grande tra lo “slogging” e la camminata per i soggetti di sesso maschile può essere dovuta al fatto che la maggior parte delle femmine fanno già jogging a una velocità di 3,0 m/s mentre la maggior parte dei maschi a questa velocità camminano. Le preferenze di andatura (cammino rispetto alla corsa) riflettono le differenze di statura tra i soggetti. I maschi, infatti, tendono ad essere più alti e ad avere un passo di lunghezza maggiore.

Una spiegazione dell'aumento di spinta verticale osservato con lo “slogging” sta nel fatto che sia i maschi che le femmine hanno un centro di gravità più alto durante il jogging lento. Questo fatto aumenta la velocità verso il basso della testa, delle braccia e del tronco, e quindi aumenta l'ampiezza della GRF.

Anche se lo “slogging” a velocità di camminata è un'andatura meno naturale, nessuno dei soggetti ha avuto problemi con questo tipo di stile di corsa. Lo “slogging”, tuttavia, è uno stile di corsa più saltellante. Quindi nella scelta tra “slogging” e camminata, alle velocità più basse, tutti i soggetti hanno preferito camminare.

Sulla base del fatto che lo “slogging” ha prodotto un significativo aumento della GRF verticale, si può concludere che questo tipo di stile di corsa deve essere evitato, dal momento che forze maggiori sono indesiderabili dal punto di vista della prevenzione degli infortuni. Uno stile di corsa con un centro di gravità più basso, invece, sembra essere quello ottimale per minimizzare la GRF.

In conclusione la conoscenza del rapporto tra velocità e forza di reazione verticale al suolo è importante per lo sviluppo di modelli muscolo-scheletrici di adattamento ad attività alterata, per il miglioramento della nostra comprensione dell'eziologia e del trattamento delle patologie associate alla corsa e per la valutazione delle prestazioni della stessa.

Il risultato di questo studio, compiuto su 13 uomini e 10 donne (atleti amatoriali) ha indicato che le forze verticali di reazione al terreno aumentano in modo lineare con la velocità di andatura fino a circa il 60% della velocità massima di ciascun soggetto. A velocità maggiori le forze verticali rimangono costanti approssimativamente a 2,5 volte il peso corporeo. Questo risultato è diverso da

quello riportato da studi precedenti per velocità di corsa di 3 – 6m/s, e si è ipotizzato essere il risultato di un baricentro più basso associato ad uno stile di corsa piegato in avanti adottato dai soggetti al fine di raggiungere elevate velocità di corsa su un percorso relativamente breve.

### ***1.5 La forza di reazione al terreno in pendenza***

Da oltre 70 anni i dati sulla forza di reazione al terreno (GRF) sono stati essenziali nella comprensione della biomeccanica della locomozione. Oggi i dati di GRF permettono di quantificare le forze in gioco negli impatti, comprendere meglio la propulsione e la frenata, calcolare le forze muscolari necessarie per eseguire determinati movimenti e calcolare cambiamenti anche minimi nell'energia meccanica. In molte zone geografiche i corridori incontrano colline, tuttavia i dati pubblicati sulla GRF che si sviluppa nella corsa in pendenza sono scarsi e questo limita la nostra conoscenza in merito.

Molti ricercatori hanno quantificato i valori di GRF per la corsa in piano (vd. per esempio [Keller et al., 1996]). Nei corridori che toccano il suolo principalmente con il retro piede a una velocità moderata di 3 m/s la componente verticale della GRF ( $GRF_v$ ) sale e scende rapidamente, formando il picco di impatto. Quindi aumenta più lentamente fino a un secondo picco a metà della fase di appoggio (mid-stance), chiamato “picco attivo”, prima di decrescere fino al distacco delle dita (toe-off, Fig.7a).

Quando il piede è a contatto del suolo la componente orizzontale è negativa e agisce come una forza frenante raggiungendo il massimo effetto a circa 1/4 della fase di appoggio prima di diminuire in grandezza e attraversare lo zero a metà della fase di appoggio. La componente orizzontale della GRF è quindi positiva come forza propulsiva e raggiunge un massimo a circa i tre quarti della fase di appoggio prima che il suo valore diminuisca prima del toe-off (Fig. 7b).

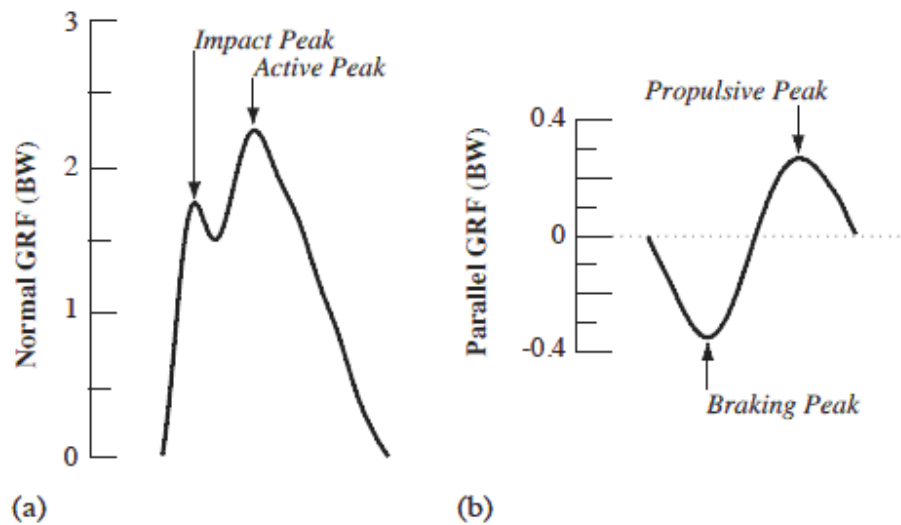


Fig.7. Tracciati tipici delle componenti normale (a) e parallela (b) della forza di reazione al terreno per corsa in piano a 3 m/s.

La scarsità di dati di GRF per la corsa in pendenza è dovuto probabilmente alla difficoltà di costruire una piattaforma di forza accoppiata a un tapis-roulant che permetta pendenze prefissate. Vista questa sfida Hamill et al. [Hamill et al., 1984] hanno usato accelerometri montati all'altezza delle tibie per misurare lo shock a livello delle gambe. Hanno trovato che questa grandezza aumentava del 30% durante una corsa in discesa a una pendenza di  $-5^\circ$  e diminuiva del 24% durante una corsa in salita a una pendenza di  $+3^\circ$ . Altri [Dick&Cavanagh, 1987] hanno assicurato una piattaforma di forza a una rampa a  $-5^\circ$  per confrontare i picchi di forza in piano e in discesa con questa pendenza. Hanno così dimostrato che durante la corsa in discesa il picco della  $GRF_v$  aumentava del 14%, gli impulsi di frenamento orizzontali aumentavano di quasi il 200% e i picchi di forza attivi verticalmente non cambiavano se confrontati con la corsa in piano. Altri ancora [Miller et al., 1988] hanno usato un trasduttore montato nella soletta interna delle scarpe per esaminare la relazione tra i picchi della forza di impatto durante la corsa di fondo in discesa ( $-3^\circ$ ) e in salita ( $+3^\circ$ ), concludendo che non c'era una differenza significativa, in contrasto con altri [Dick&Cavanagh,

1987]. Altri ancora [Iversen&McMahon, 1992] hanno utilizzato una piattaforma di forza incorporata in un tapis roulant motorizzato per raccogliere i dati sulla  $GRF_v$  mentre il soggetto correva in salita o in discesa. Il loro dispositivo, tuttavia, non poteva misurare forze parallele. I loro risultati sono stati che il picco di forza attiva in direzione normale, rispetto alla corsa in piano, era maggiore del 2% durante la corsa in discesa ( $-10^\circ$ ) e minore dell'11% durante la corsa in salita ( $+10^\circ$ ). I loro dati sul picco di forza attivo durante la corsa in discesa, quindi, contraddiceva alcuni risultati precedentemente ottenuti [Dick&Cavanagh, 1987]. Questi studi hanno fatto avanzare la nostra comprensione della corsa in pendenza ma nessuno ha quantificato le componenti normale e parallela della GRF per un intervallo di pendenza in salita e in discesa. I dati dei diversi studi, inoltre, sono in contraddizione gli uni con gli altri.

Anche se i dati di GRF pubblicati sono pochi, le passate ricerche hanno fornito numerose risposte in merito all'energetica della corsa in pendenza, all'azione dei muscoli e alla meccanica. Per esempio un autore [Margaria, 1976] ha mostrato che durante la corsa ad andatura moderata in discesa il costo energetico metabolico diminuisce e raggiunge un minimo a circa  $-8^\circ$ , oltre il quale la curva del costo energetico si flette e comincia ad aumentare in modo curvilineo. Durante la corsa in salita, invece, il costo energetico aumenta linearmente con la pendenza.

La corsa in salita richiede un aumento nell'attività dei muscoli delle gambe, in particolare il *vastus medialis*, il *biceps femoris*, e il gastrocnemio, che corrispondono a un aumento nella velocità di lavoro esterno durante la locomozione in salita. Altri autori [Buczek&Cavanagh, 1990]) hanno quantificato quanto lavoro negativo viene assorbito dalle articolazioni delle ginocchia e delle caviglie durante la corsa in discesa. Klein e collaboratori [Klein et al., 1997]) hanno inoltre concluso che la lunghezza del passo, il tempo di contatto e il tempo di volo non cambiano significativamente durante la corsa in pendenza a velocità costante.

Rimangono ancora irrisolte domande alle quali si può rispondere solo raccogliendo dati sulla GRF a diverse pendenze sia durante la corsa in salita che in discesa. Per esempio, se le forze di impatto cambiano durante la corsa in salita e in discesa questo aumenta o diminuisce la possibilità di infortuni? I picchi di forza attivi aumentano durante la corsa in discesa o rimangono invariati? Può lo schema di forza propulsiva spiegare l'andamento del costo dell'energia metabolica per la corsa in pendenza? Il fine del lavoro Gottschall&Kram [Gottschall&Kram, 2005] era di quantificare le GRF durante la corsa in salita e in discesa. Per far questo sono state misurate le forze sia normalmente che parallelamente alla superficie del tapis roulant in maniera analoga alla corsa in piano. Per farlo un



tapis roulant è stato montato su cunei regolabili a diversi angoli. Sono state verificate tre ipotesi: rispetto alla corsa in piano (1) i picchi della forza di impatto normale sarebbero più alti durante la corsa in discesa e più bassi durante la corsa in salita, (2) i picchi di forza attiva normale sarebbero più alti durante la corsa in discesa e più bassi durante la corsa in salita, (3) i picchi di forza frenante parallela sarebbero più alti durante la corsa in discesa e i picchi di forza propulsiva sarebbero più alti durante la corsa in salita. Secondo gli autori dello studio [Gottschall&Kram, 2004] questi cambiamenti nelle forze parallele dovrebbero essere simmetriche ma opposte per la corsa in discesa e in salita a ogni pendenza.

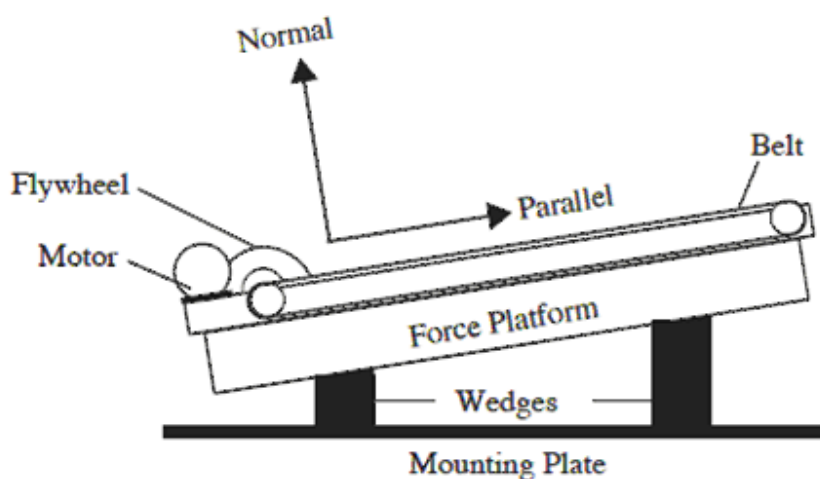


Fig.8. Tapis roulant per misurare la forza montato a +9°.

Per verificarlo dieci volontari (cinque uomini e cinque donne con un'età media di 30,35 anni, un'altezza media di 1,72 m e un peso medio di 62,56 Kg), corridori amatoriali, hanno corso su un tapis roulant montato su cunei per fissare la pendenza a 3°, 6° e 9° (rispettivamente 5,2%, 10,5% e 15,8 %) sul quale erano stati fissati dei trasduttori di forza.

L'apparecchiatura è stata prima provata a vuoto determinandone la più bassa frequenza caratteristica

in piano (176 Hz normale e 86 Hz parallela), verificando che con un'inclinazione di  $9^\circ$  questa variasse in maniera trascurabile (diventando rispettivamente 172 Hz normale e 81 Hz parallela).

I soggetti hanno poi corso a 3 m/s sul tapis roulant montato in piano, in discesa e in salita e i dati di GRF sono stati raccolti negli ultimi 10 sec di ogni prova. Questi sono stati filtrati per eliminare eventuali vibrazioni provenienti dal motore del tapis roulant e poi normalizzati in modo che il valore medio di ogni componente durante la fase di volo fosse uguale a zero. Infine si è determinato il momento di appoggio del piede quando la componente normale della GRF era superiore a 1000 N/s mentre la forza era al di sotto di una soglia di 100 N/s. La divisione dei soggetti in chi appoggiava prima il retropiede e chi il mesopiede è avvenuta sulla base dell'osservazione diretta e dell'analisi della componente normale della GRF.

Per ogni condizione sono stati calcolati i picchi di forza normali, gli impulsi e le variazioni nel tempo del carico in aggiunta ai picchi di forza paralleli e gli impulsi mediando 20 passi per ogni soggetto. La forza attiva normale è stata determinata partendo dal toe-off (distacco delle dita) e lavorando all'indietro nel tempo verso il momento dell'appoggio. In modo simile sono state calcolate le forze di frenamento parallele e propulsive. I dati sugli impulsi normali e paralleli sono stati ottenuti integrando tutti i valori positivi (propulsiva normale e parallela) o negativi (frenamento parallelo) della GRF durante ogni contatto col suolo, dando l'impulso medio per passo. La variazione di carico media corrisponde all'ampiezza del picco della forza di impatto divisa per il tempo tra l'appoggio ("foot strike") e il picco della forza di impatto. Il massimo di questa grandezza è stato calcolato dalla derivata istantanea della GRF normale rispetto al tempo.

I picchi di forza normale di impatto ottenuti erano significativamente più alti per la corsa in discesa e più bassi per la corsa in salita, se confrontati con la corsa in piano. Questi risultati sono parzialmente dovuti all'alterazione della tecnica di appoggio durante la corsa in salita. Tutti e dieci i soggetti esaminati hanno infatti iniziato la fase di appoggio con il retropiede durante la corsa a  $-9^\circ$ ,  $-6^\circ$ ,  $-3^\circ$  e  $+3^\circ$  ma a  $+6^\circ$  tre soggetti sono passati a uno schema di appoggio del mesopiede e a  $+9^\circ$  tutti i soggetti atterravano sul mesopiede. Quindi sono stati valutati i dati impatto normale per tutti e dieci i soggetti durante la corsa in discesa a  $-9^\circ$ ,  $-6^\circ$  e  $-3^\circ$ , la corsa in piano e la corsa in salita a  $+6^\circ$ . Rispetto alla corsa in piano a  $-9^\circ$  il picco di impatto normale aumentava del 54%, a  $-6^\circ$  del 32% e a  $-3^\circ$  del 18%. A un angolo di salita di  $+3^\circ$  il picco di impatto normale diminuiva di un non significativo 13% (Tabella 3). Tuttavia per i sette soggetti con uno schema di appoggio sul retropiede a  $+6^\circ$  il picco di impatto normale diminuiva del 22% (Tabella 4).

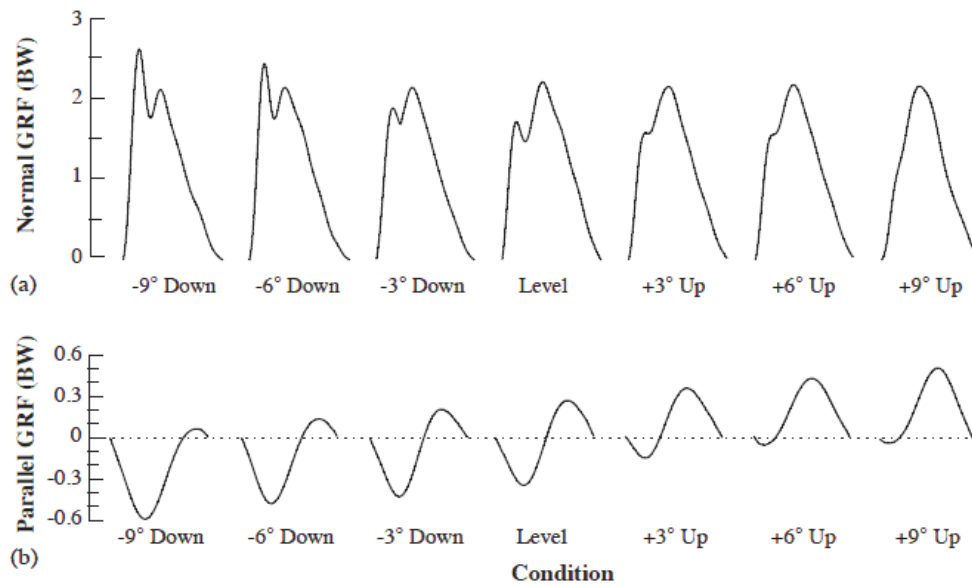


Fig.9. Componenti normale (a) e parallela (b) della GRF in funzione del tempo per un soggetto tipico (73 Kg) che corre a 3 m/s.

Le variazioni nel tempo del carico di impatto normale erano anch'essi maggiori per la corsa in discesa e ridotti per la corsa in salita. I picchi di forza attiva normale non cambiavano significativamente durante la corsa in salita o in discesa (Fig. 9a). I picchi di forza di frenamento parallela erano più alti per la corsa in discesa e più bassi per la corsa in salita (Fig. 9b). Viceversa i picchi di forza propulsiva parallela media erano più bassi per la corsa in discesa e più alti per la corsa in salita (Fig. 9b).

Table 1  
Effects of downhill and uphill angle on running normal impact force peaks and loading rates

Condition (deg)	Normal impact force peak (N), <i>n</i> = 10	Normal impact force peak (N), <i>n</i> = 7	Ave impact loading rate (kN/s), <i>n</i> = 10	Ave impact loading rate (kN/s), <i>n</i> = 7	Max impact loading rate (kN/s), <i>n</i> = 10	Max impact loading rate (kN/s), <i>n</i> = 7	Normal active force peak (N) <i>n</i> = 10
-9 Down	1504±273 <sup>†</sup>	1504±362 <sup>†</sup>	47.7±9.3*	49.1±12.6*	94.6±29.8	83.8±24.8*	1341±177
-6 Down	1283±255*	1305±322*	44.8±8.9*	44.8±11.5*	88.2±28.5	79.2±23.2*	1325±205
-3 Down	1149±263*	1174±375*	41.3±9.4	42.6±10.8	78.0±25.9	73.0±12.1	1375±198
Level	974±193	988±252	34.9±6.2	36.3±6.7	71.2±20.8	66.1±13.0	1373±199
+3 Up	848±176	840±222	27.8±8.4	32.5±7.8	57.5±20.0	53.5±13.5	1384±168
+6 Up	—	767±184*	—	29.4±5.7*	—	48.9±15.8*	1362±174
+9 Up	—	—	—	—	—	—	1334±182

Values represent means for all 10 subjects±standard deviation and 7 subjects that initiated foot strike on their rear-foot. Conditions that differ from level running are denoted with an <sup>\*</sup>, *p*<0.05 or with an <sup>†</sup>, *p*<0.01.

Tab. 3. Effetti dell'angolo di corsa in salita e in discesa sui picchi della forza normale e le variazioni nel tempo del carico.

Table 2  
Effects of downhill and uphill angle on braking and propulsive peaks and impulses

Condition (deg)	Braking peak (N)	Propulsive peak (N)	Braking impulse (Ns)	Propulsive impulse (Ns)
-9 Down	-337±102	66±13	-34.7±6.7	7.1±2.4
-6 Down	-284±77	102±24	-28.9±5.1	9.5±2.1
-3 Down	-248±56	132±22	-22.3±3.5	12.5±1.2
Level	-195±21	169±12	-16.7±3.7	16.5±2.9
+3 Up	-157±47	216±26	-11.4±3.2	21.4±3.2
+6 Up	-122±78	253±32	-9.2±2.7	23.7±3.2
+9 Up	-89±106	296±29	-5.8±2.9	27.7±3.8

Values represent means for 10 subjects±standard deviation. All conditions differed from level running, *p*<.0001.

Tab.3. Effetti dell'angolo di salita e di discesa sui picchi della forza di frenamento e sugli impulsi.

I dati dell'impulso parallelo avevano andamenti simili a quelli del picco delle forze parallele (Tabella 3).

Table 3  
Effects of downhill and uphill angle on running kinematics

Condition (deg)	Stride freq (Hz)	Stride length (m)	Contact time (s)	Swing time (s)	Duty factor
-9 Down	1.42±0.10	2.12±0.16	0.22±0.02	0.47±0.03	0.32±0.02
-6 Down	1.42±0.08	2.12±0.14	0.22±0.02	0.47±0.03	0.32±0.02
-3 Down	1.43±0.07	2.10±0.11	0.23±0.01	0.47±0.04	0.32±0.01
Level	1.45±0.06	2.07±0.10	0.23±0.02	0.47±0.02	0.33±0.01
+3 Up	1.46±0.06	2.07±0.09	0.23±0.01	0.47±0.04	0.33±0.01
+6 Up	1.49±0.07	2.02±0.10	0.23±0.01	0.45±0.03	0.34±0.01
+9 Up	1.51±0.07*	1.99±0.10*	0.23±0.01	0.45±0.03	0.35±0.01*

Duty factor is the fraction of the stride period that one foot spends in contact with the ground. Values represent means for 10 subjects±standard deviation. Conditions that differ from level running are denoted with an <sup>\*</sup>, *p*<0.05.

Tab. 4. Effetti dell'angolo di salita e di discesa sulla cinematica della corsa.

La cinematica della falcata era consistente durante la corsa in salita e in discesa (Tabella 4). A parte l'angolo di pendenza positiva più elevato le caratteristiche del passo per le altre pendenze erano significativamente simili. Per  $+9^\circ$ , invece, la frequenza della falcata aumentava del 4%.

L'ipotesi che i picchi di forza di impatto normale siano più alti durante la corsa in discesa è quindi verificata. Questi cambiamenti nelle forze di impatto durante la corsa in pendenza sono accentuate dal fatto che i soggetti alterano il ciclo del passo. Durante la corsa in discesa e in piano tutti i soggetti entravano a contatto con il terreno per primo con il retropiede ma, man mano che la pendenza aumentava, il primo contatto si spostava sempre di più sul mesopiede.

I dati dei picchi di forza di impatto normale suggeriscono che la probabilità di infortuni muscolo-scheletrici cresca durante la corsa in discesa e diminuisca durante la corsa in salita. In effetti Hreljac e collaboratori [Hreljac et al., 2000] hanno trovato che la principale variabile biomeccanica che distingue i corridori che non si sono mai infortunati dagli altri è l'ampiezza della forza di picco di impatto. Secondo i dati dei due studi [Gottschall&Kram, 2005; Hreljac et al., 2000] persone che cercano di recuperare da infortuni da impatto dovrebbero evitare di correre in discesa e dovrebbero possibilmente inserire, nel loro programma di recupero, la corsa in salita sul tapis roulant.

L'ipotesi, invece, che i picchi di forza attiva normale siano più alti durante la corsa in discesa deve essere rigettata (non si sono trovati cambiamenti significativi). Allo stesso modo, va rigettata l'ipotesi che cambiamenti nelle forze parallele siano simmetricamente opposti per la corsa in salita e in discesa alle stesse pendenze (in valore assoluto).

In conclusione, a seconda della pendenza del terreno succedono le seguenti cose:

- i picchi di forza di impatto normale diminuiscono
- i picchi di forza attiva normale sono invariati
- i picchi di forza di frenamento parallela diminuiscono
- i picchi di forza propulsiva parallela aumentano.

Questi dati possono spiegare la variazioni nel consumo di energia metabolica durante la corsa in discesa e suggeriscono che la corsa in discesa aumenti il rischio di infortuni.

## 2. Materiali e metodi di generazione dei profili di forza

I profili relativi alle componenti di forza di reazione verticale (GRF<sub>v</sub>) e parallela (Antero Posterior GRF) descritti nel precedente capitolo (si veda la figura 6 del capitolo 1) sono stati generati in Matlab a partire dai dati normativi. Sono stati trattati separatamente i profili relativi alla camminata e alla corsa perché danno come risultato forme d'onda completamente diverse (si veda ancora la figura 6 del capitolo 1).

Sono state analizzate e riprodotte prima la forza di reazione verticale e poi la componente antero posteriore.

Per quanto riguarda la componente verticale, è stato generato in primo luogo il profilo relativo alla camminata a velocità pari a 1.5 m/s, utilizzando i dati relativi al picco massimo di forza, e sono state poi tracciate le forme d'onda relative alle velocità di 2.5, 4 e 6 m/s.

Analogamente, si è generata la componente antero posteriore alle stesse velocità.

Sono stati considerati in seguito i dati relativi alle pendenze di +3, +6, +9 gradi modificando i profili trovati sulla base di tali dati.

### 2.1 GRF<sub>v</sub>, Camminata $v=1.5$ m/s

Si è scelto di modellare la componente verticale relativa alla camminata a 1.5 m/s con la somma di tre funzioni di forma gaussiana di equazione

$$f(x) = P e^{-(x-\mu)^2 / 2\sigma^2}$$

Le tre funzioni sono state opportunamente scalate di un offset per far sì che le code delle gaussiane non si annullassero all' infinito ma la forma d'onda risultante iniziasse e terminasse a zero.

Sono state scelte queste 3 funzioni, in quanto, la loro somma riproduce in maniera soddisfacente la forma d'onda del profilo di forza originale.

In particolare, la curva ottenuta fa riferimento alla sola fase di "stance"(appoggio) del ciclo del passo (Fig.1).

La fase di "swing"(fase di volo) è stata infine rappresentata in Matlab con un vettore di zeri di lunghezza opportuna.

Nella figura seguente, la forma d'onda in nero è quella relativa alla somma delle tre gaussiane e sembra interpolare abbastanza bene i dati (punti contrassegnati in blu)

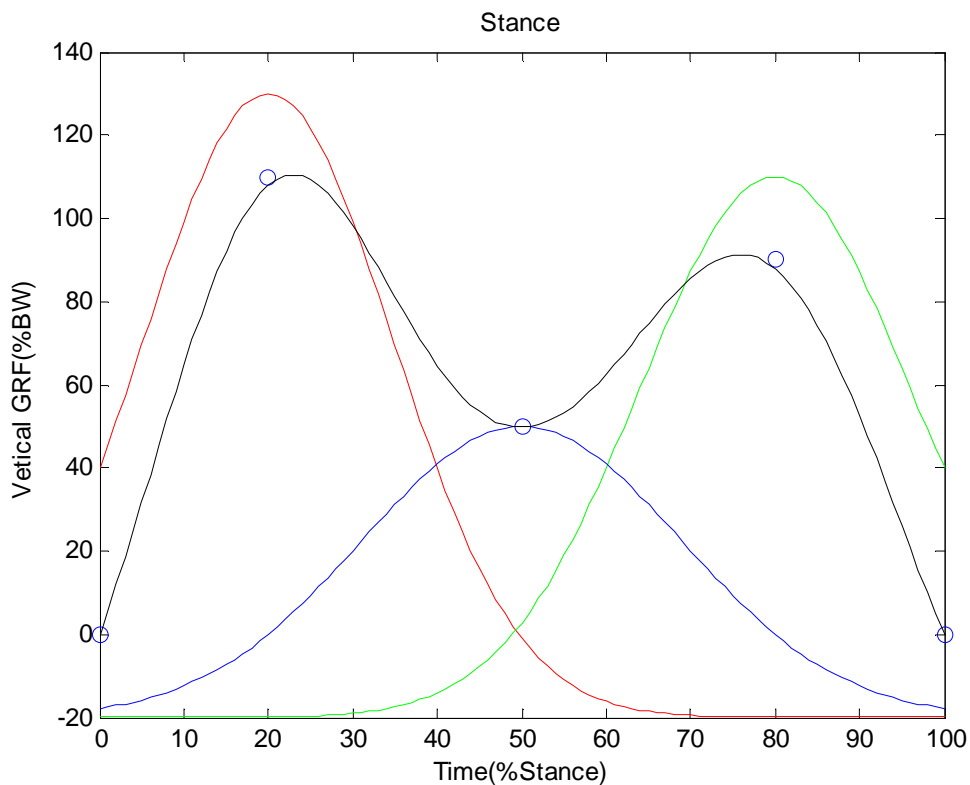


Fig.1 Somma delle tre funzioni di forma gaussiana di ampiezza diversa relativa alla fase di "stance" durante la camminata a 1.5 m/s



Il passo successivo nella generazione di questo primo profilo è stato considerare i dati relativi alla durata del ciclo del passo (gait cycle) relativi alla camminata (si veda la figura 3 del cap.1)

Di questa si è considerata, innanzi tutto, la durata di un singolo stride (fase di appoggio + fase di volo) e le rispettive durate della fase di appoggio (62) e di volo (38) di cui esso è costituito.

Poiché questi dati erano relativi a una velocità di camminata pari a 1.2 m/s mentre la velocità di interesse era di 1.5 m/s , si è deciso di approssimare tali valori a 60 per la fase di appoggio e 40 per la fase di volo.

Questa prima approssimazione non è stata casuale ma è stata fatta in seguito alla constatazione dell'andamento decrescente di tali valori all'aumentare della velocità.

A questo punto si è dovuto convertire l'unità di misura di questi dati, al fine di avere la durata della fase di appoggio e di volo espressa in secondi.

Si è a tal fine impostata una semplice proporzione:

$$0.60:1=100:x$$

Dove 0.60 è il valore in secondi misurato dal grafico relativo alla fase di appoggio, 1 sec è la durata dello "stride", mentre 100 è il numero totale di campioni relativi all'intera forma d'onda.

Dall'equazione sopra risulta:

$$x=160 \quad \text{frequenza di campionamento asse dei tempi}$$

e di conseguenza

$$1/x=1/160 \quad \text{periodo di campionamento asse dei tempi}$$

Per creare la fase di swing in Matlab si è quindi utilizzato un vettore di zeri di lunghezza pari alla durata della fase di swing in secondi moltiplicata per la frequenza di campionamento dell'asse dei

tempi.

La forma d'onda risultante è quella mostrata nella seguente figura:

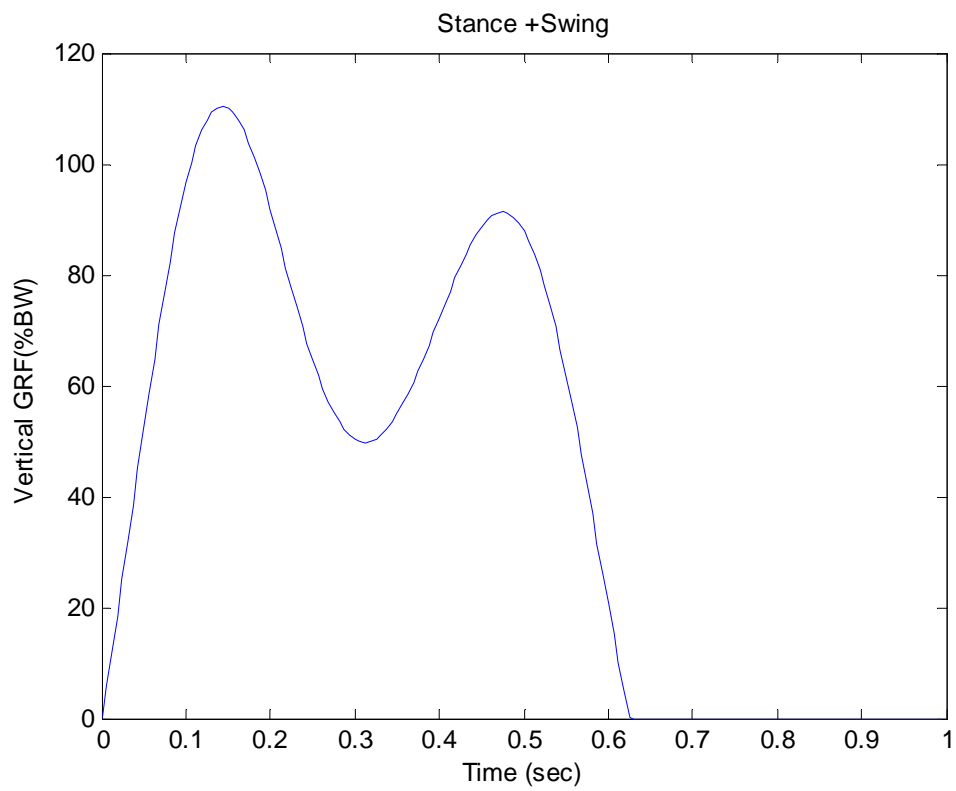


Fig.2 Forma d'onda relativa alla fase di appoggio e di volo

Successivamente, al fine di generare un profilo della durata di 15 sec, si è ripetuto l'elemento

“stance+ swing” per 15 volte.

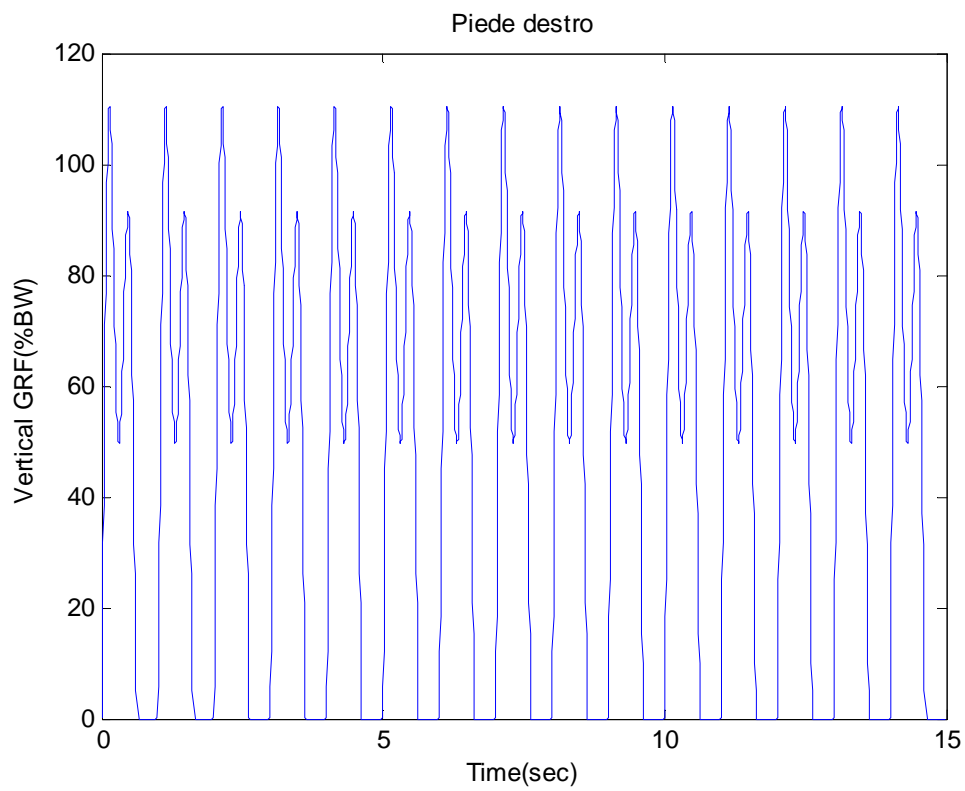


Fig.3 Profilo di forza di reazione verticale relativo al solo piede destro

Questo procedimento è stato ripetuto in maniera analoga per il profilo relativo al piede destro e al piede sinistro considerandoli separatamente e tenendo conto dello sfasamento tra essi riportato nel grafico mostrato nella Fig.3 del Cap.1.

Analogamente al ragionamento fatto prima, la lunghezza da assegnare al vettore Matlab per lo sfasamento è stata ottenuta moltiplicando il tempo di sfasamento desunto dal grafico per la frequenza di campionamento dell'asse dei tempi.

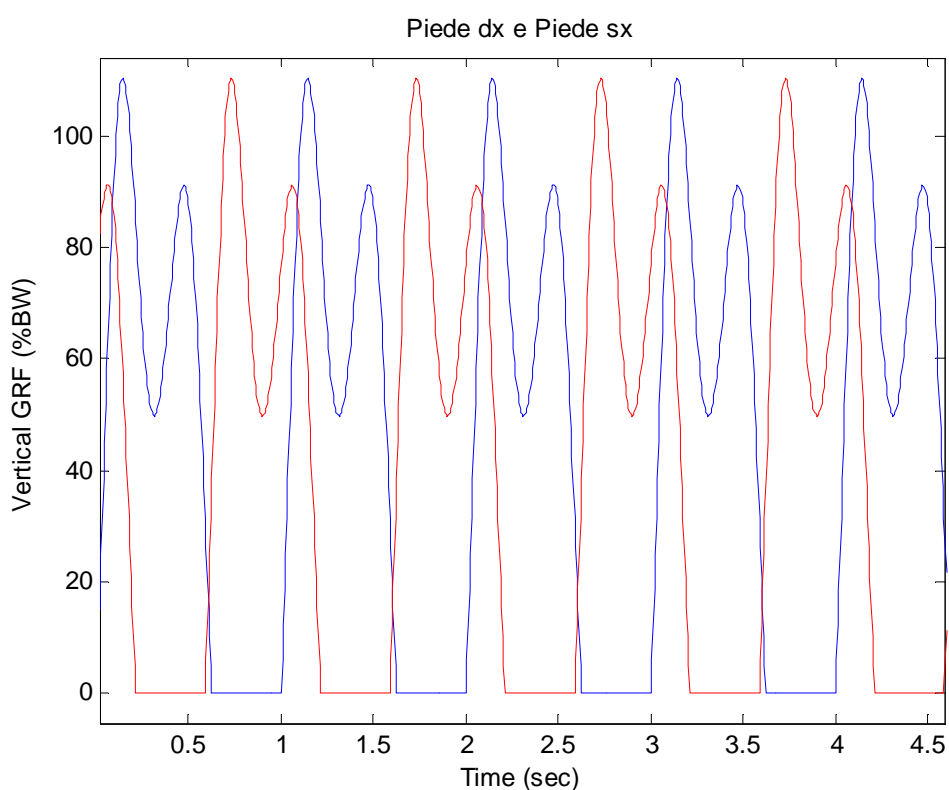


Fig.4 Profilo relativo al piede destro e al piede sinistro opportunamente sfasati

Il profilo totale relativo alla componente verticale della forza di reazione per la camminata a 1.5 m/s è stato infine ottenuto semplicemente sommando le due forme d'onda relative al piede destro e al piede sinistro.

Inoltre per riportare l'unità di misura del profilo di forza in N anziché in %BW (%peso corporeo) si è considerato anche il peso del soggetto.

Qui in particolare si è considerato un soggetto di 78 Kg e si è espresso prima il peso in Newton

( $P=78*9.81$ ) e poi si è moltiplicato il profilo risultante dalla somma del piede destro e del piede sinistro per il peso e si è diviso per 100.

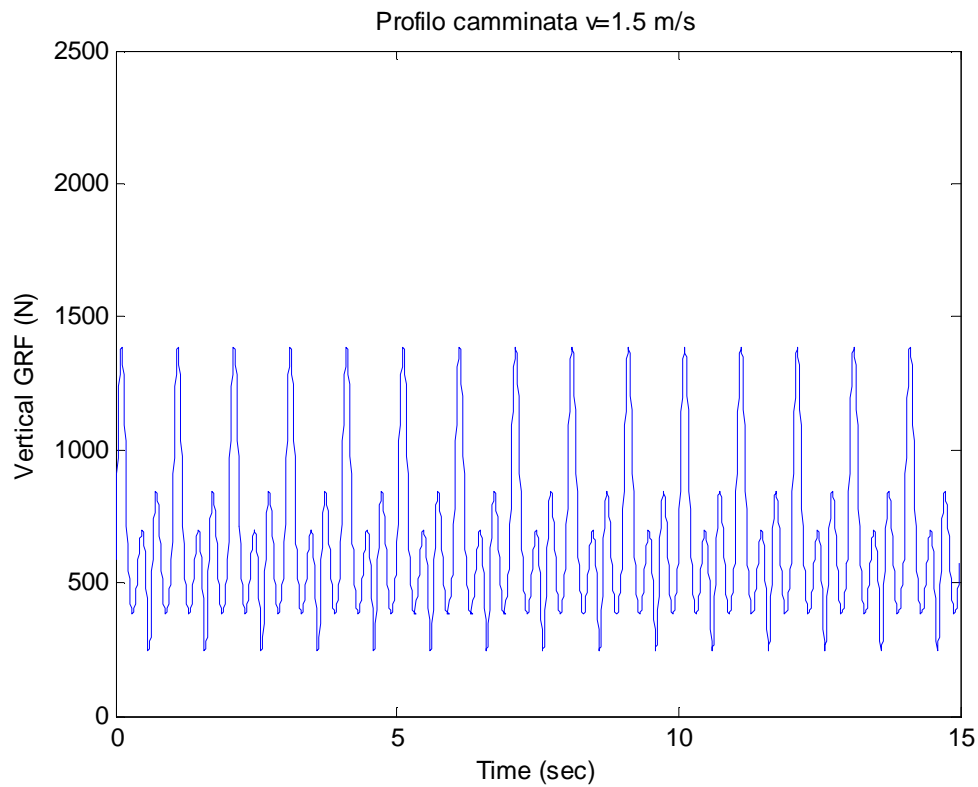


Fig.5 Profilo relativo alla forza di reazione verticale per un soggetto di 78 Kg che cammina ad una velocità di 1.5 m/s

## 2.2 $GRF_v$ Corsa $v=2.5$ m/s

La componente della forza di reazione verticale relativa alla corsa a 2.5 m/s è stata ottenuta con un procedimento analogo al precedente ma con una sostanziale differenza: la forma d'onda relativa

alla fase di “stance” è stata approssimata con un’unica funzione gaussiana di ampiezza pari alla somma delle ampiezze delle due gaussiane con le quali è stata modellata la forma d’onda del cammino.

Dal grafico in fig.6 cap.1 si può infatti notare come i due picchi di forza rimangono separati alle basse velocità e si iniziano a sommare a partire dalla velocità di 2.5 m/s.

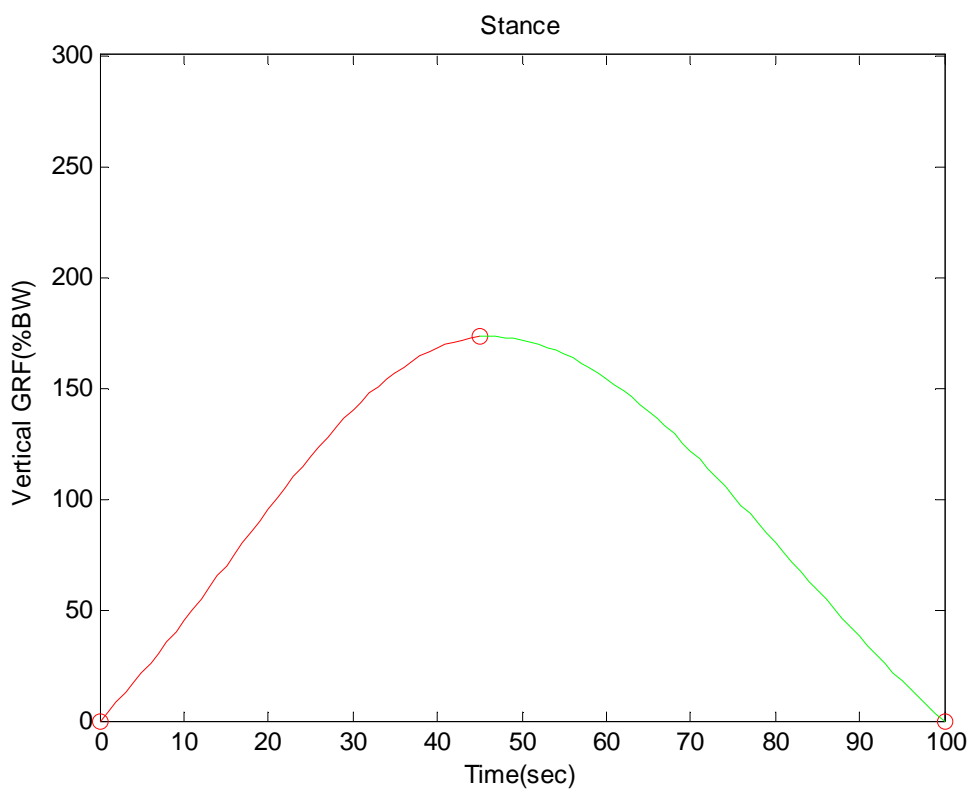


Fig.6 Forma d’onda relativa alla fase di “stance” durante la corsa a 2.5 m/s, i diversi colori evidenziano i diversi contributi nella somma delle 2 gaussiane

Con un procedimento analogo a quello descritto per il cammino si è creato l’elemento relativo allo “stride” utilizzando però dati differenti sulla temporizzazione dei due piedi .

Poiché non si avevano dati espliciti relativi alle durate delle varie fasi del ciclo del passo alla

velocità di 2.5m/s si è dovuto mediare tra quelli relativi alla velocità di 1.2 m/s e di 3.2m/s a nostra disposizione, partendo dalla constatazione che, in generale, all'aumentare della velocità il tempo totale di stride e il tempo di "stance" diminuiscono mentre il tempo di "swing" aumenta.

Per cercare di ottenere dati più precisi sono stati posti in grafico i suddetti tempi in funzione della velocità e si è anche trovata una relazione matematica che esprimesse l'andamento di essi in funzione della velocità attraverso la tecnica del fitting ai minimi quadrati.

Ad esempio, per quanto riguarda l'andamento del tempo di "stride" in funzione della velocità, si è ottenuto il seguente grafico:

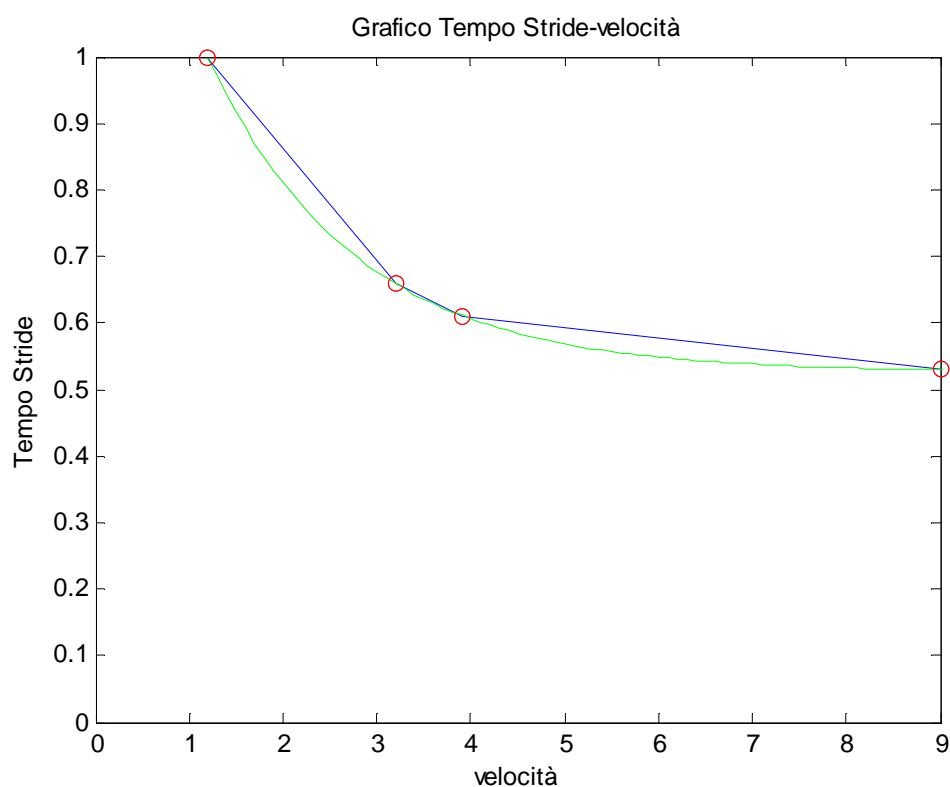


Fig.7 Andamento del tempo di "stride" in funzione della velocità, la curva in verde è l'esponenziale che interpola al meglio i dati utilizzata nel fitting dei parametri

La stessa operazione di fitting è stata ripetuta anche per il tempo di “stance” e per il tempo di “swing”.

In base ai valori desunti da tali grafici si è potuto creare l’elemento “stance + swing” analogamente a quanto descritto per la camminata e si è ripetuto più volte tale elemento al fine di generare un profilo della durata di 15 secondi. Questo è stato fatto sia per il piede destro che il piede sinistro e, considerando lo sfasamento tra i due piedi relativo alla velocità di 2.5 m/s, si sono ottenute le seguenti forme d’onda:

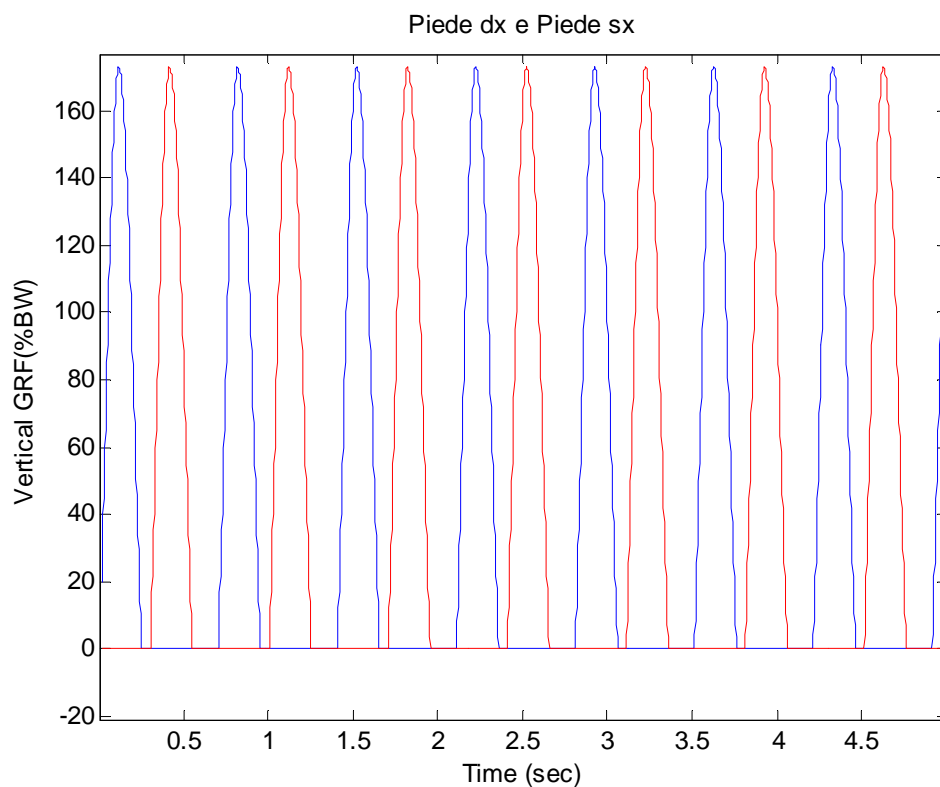


Fig.8 Forza di reazione verticale relativa al piede destro e sinistro opportunamente sfasati alla velocità di corsa di 2.5 m/s



Con procedimento analogo a quello descritto nel paragrafo precedente si è poi generato il profilo totale dalla somma dei due profili relativi ai piedi destro e sinistro, e la forza di reazione verticale è stata espressa in N considerando un soggetto di 78 Kg di peso.

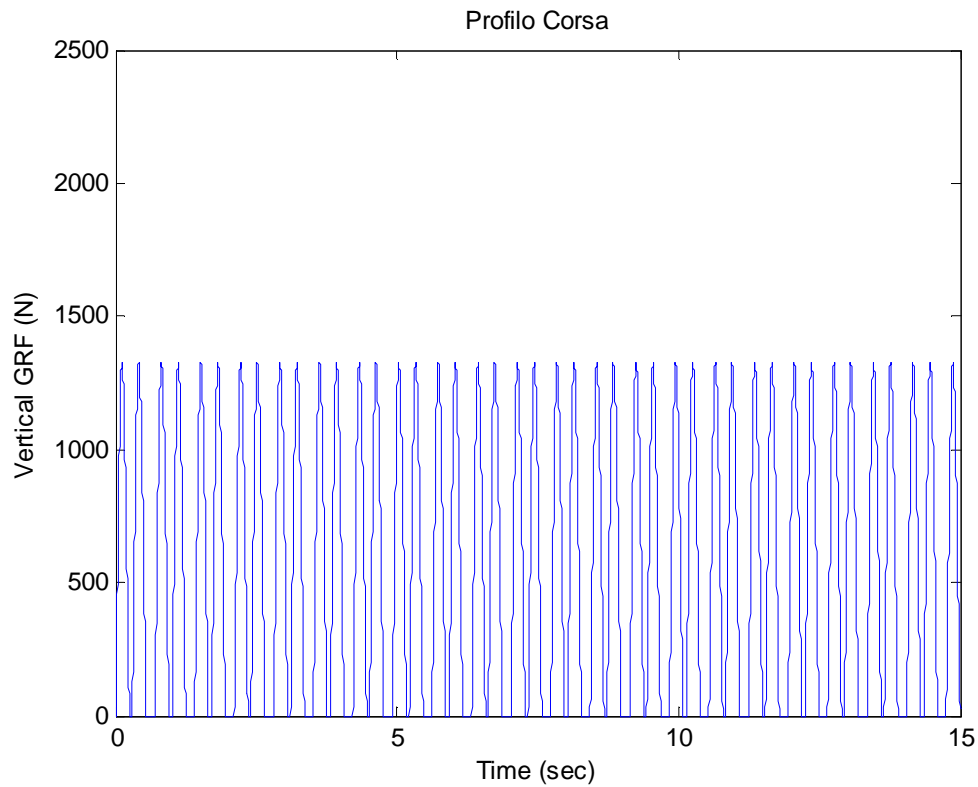


Fig.9 Profilo relativo alla forza di reazione verticale per la corsa a 2.5m/s

### ***2.3 GRF Antero Posteriore***

Per quanto riguarda la creazione del profilo relativo alla componente di forza antero posteriore si sono utilizzati dati riportati in sintesi nel seguente grafico:

## BIOMECHANICS OF TREADMILL WALKING

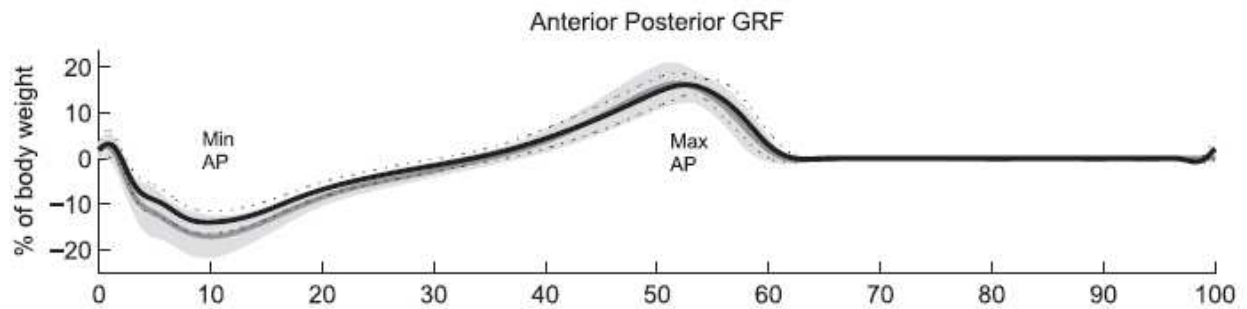


Fig.10 Andamento della componente antero posteriore della forza di reazione all'aumentare della velocità (Da Biomechanics of treadmill walking J. Appl. Physiol. 2008-Lee-747-55)

Il precedente grafico mostra come all'aumentare della velocità si accentuino i picchi relativi rispettivamente al minimo e al massimo della componente antero posteriore (zona ombreggiata). Il procedimento utilizzato è analogo a quello descritto finora ma la forma d'onda utilizzata, relativa alla fase di "stance", è completamente diversa. Per rappresentare in Matlab tale forma d'onda si è utilizzata la composizione di 4 tratti di parabole diverse passanti rispettivamente per i punti desunti dai dati in figura 9.

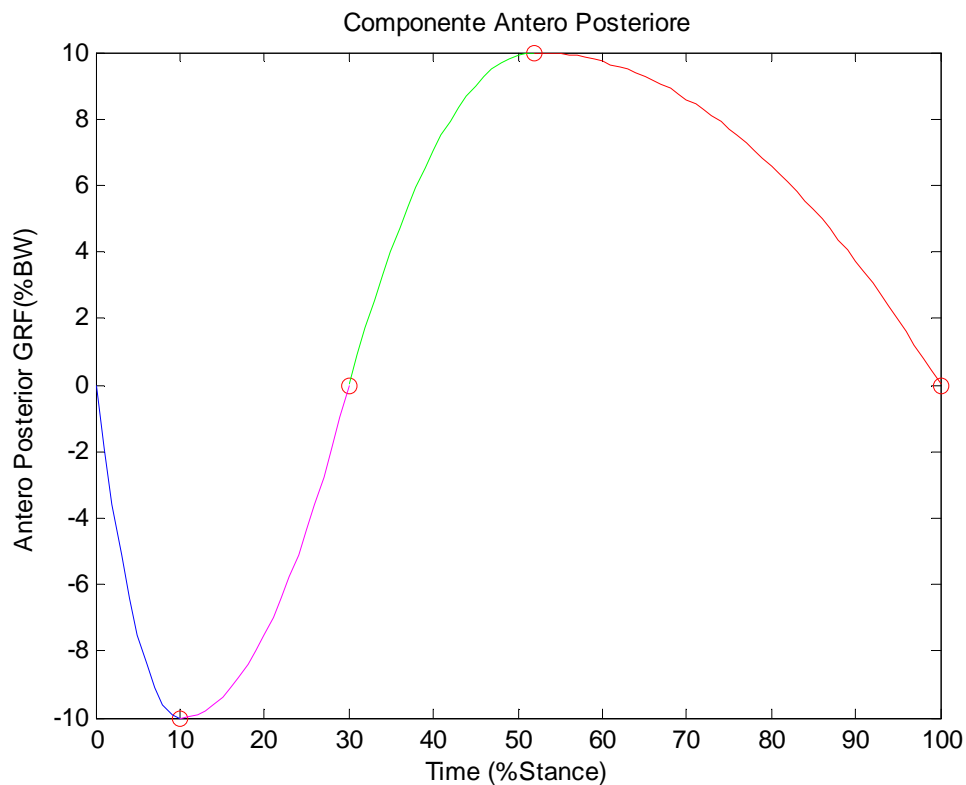


Fig.11 Forma d'onda relativa alla componente antero posteriore alla velocità di camminata a 1.5 m/s, i vari colori evidenziano i contributi delle 4 diverse parabole utilizzate.

Ripetendo lo stesso procedimento descritto in precedenza si sono potuti creare l'elemento relativo allo "stride" e quindi il profilo totale della durata di 15 secondi sia per il piede destro che per il sinistro, considerando l'opportuno sfasamento tra loro.

Dalla somma dei due, infine, si sono creati i profili risultanti della componente antero posteriore: il primo alla velocità di camminata a 1.5 m/s e il secondo relativo alla corsa a 2.5 m/s per un soggetto di 78 Kg.

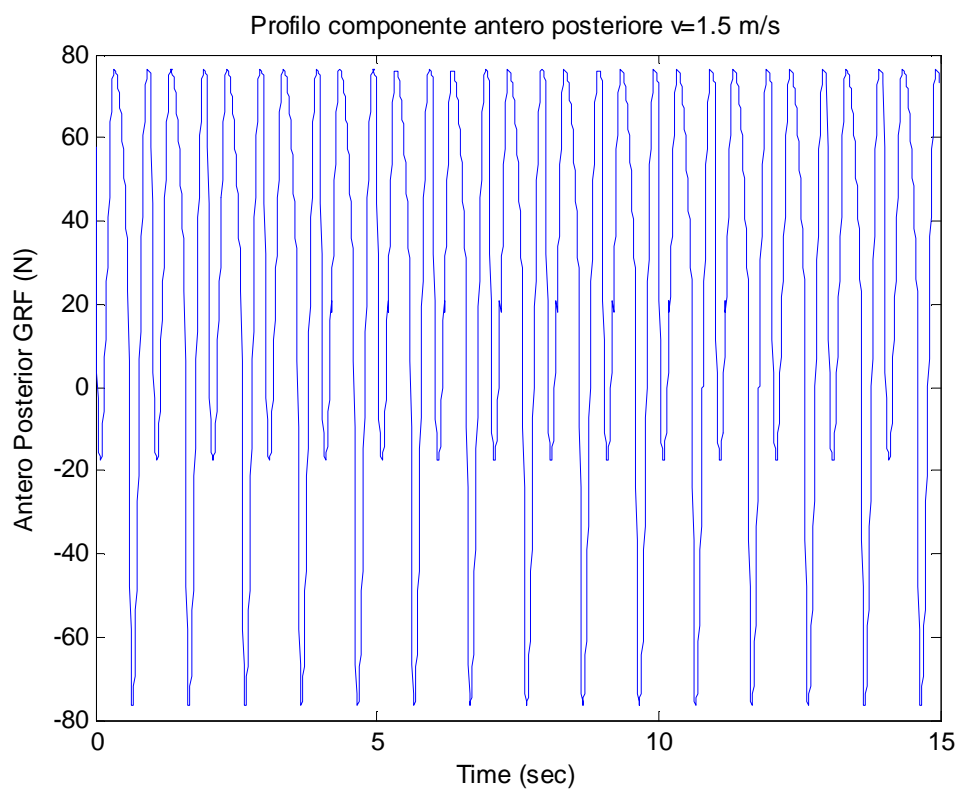


Fig.12 Profilo relativo alla componente antero posteriore della forza di reazione per un soggetto di 78 Kg alla velocità di 1.5 m/s

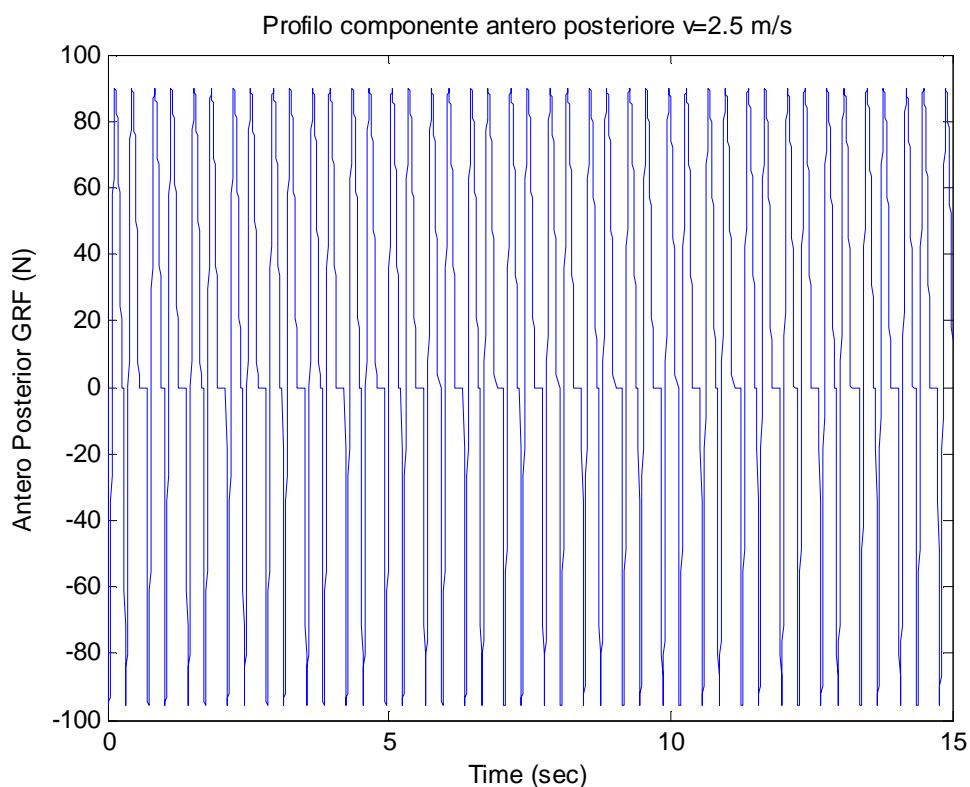


Fig.13 Profilo relativo alla componente antero posteriore della forza di reazione per un soggetto di 78 Kg alla velocità di 2.5 m/s

## 2.4 Profili in Pendenza

Per quanto riguarda la generazione dei profili in pendenza sono stati considerati i dati riportati nel paragrafo 5 del capitolo 1. In particolare si è cercato di riprodurre in Matlab gli andamenti riportati nel grafico in fig.9 del capitolo 1.

Di quest'ultimo sono stati presi in esame solamente i dati relativi alle pendenze positive, in quanto considerati di maggiore interesse per la modellazione dei profili di cammino e di corsa su treadmill.

Da essi si sono evidenziate due fondamentali caratteristiche:

-il picco massimo della reazione verticale diminuisce linearmente, anche se di una minima quantità, all'aumentare della pendenza

-la componente antero posteriore risulta praticamente ribaltata all'aumentare della pendenza rispetto agli stessi valori di pendenza negativa

Per quanto riguarda la componente verticale si è anzitutto ricavata la relazione che lega la variazione del picco massimo della forza di reazione verticale e la variazione di pendenza utilizzando il metodo del fitting ai minimi quadrati.

Si è quindi ottenuto il seguente andamento lineare:

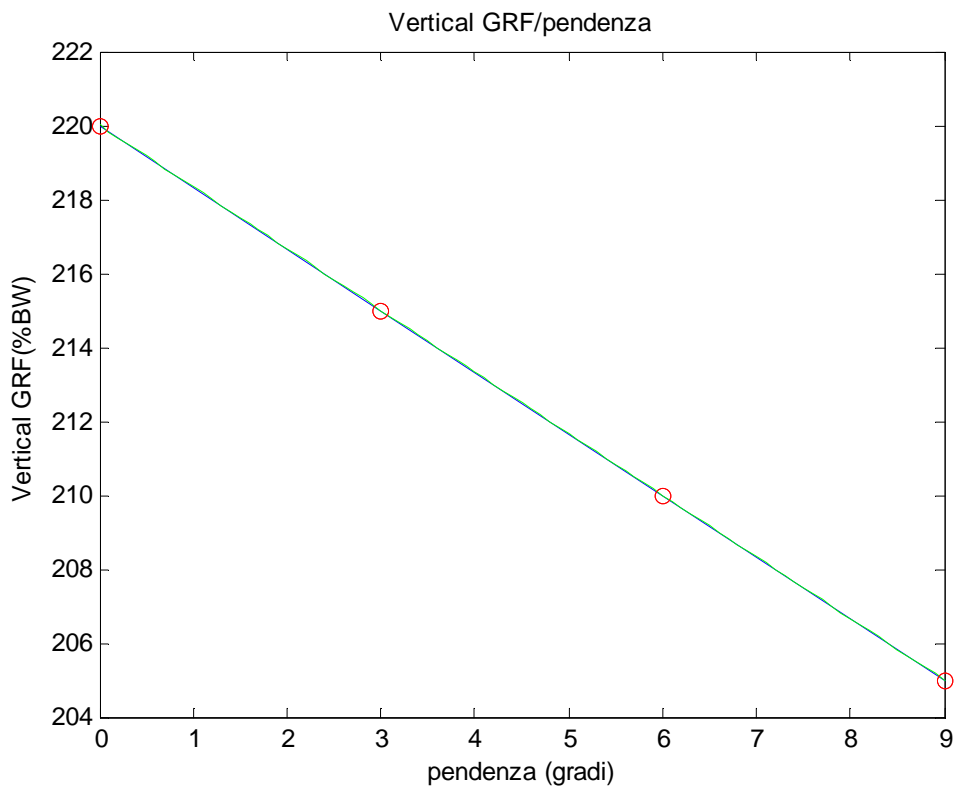


Fig.14 Andamento del picco massimo della forza di reazione verticale in funzione della pendenza

Visto l'andamento lineare decrescente, il profilo di reazione verticale è stato modificato rispetto alla condizione di pendenza nulla semplicemente andando a sostituire nel programma Matlab i dati

relativi al picco massimo di forza alle varie pendenze di interesse, desumendoli dal grafico precedente.

Si è così ottenuta una forma d'onda risultante identica a quella relativa a condizioni di pendenza nulla ma con i picchi leggermente abbassati.

Ad esempio, è stato assunto che i due picchi presenti nella forma d'onda ottenuta nel caso del cammino in pendenza si abbassassero della stessa quantità .

Nella seguente figura è riportata la diminuzione dell'ampiezza di tali picchi relativi alla fase di stance in condizioni di pendenza di  $+6^\circ$  alla velocità di 1.5 m/s

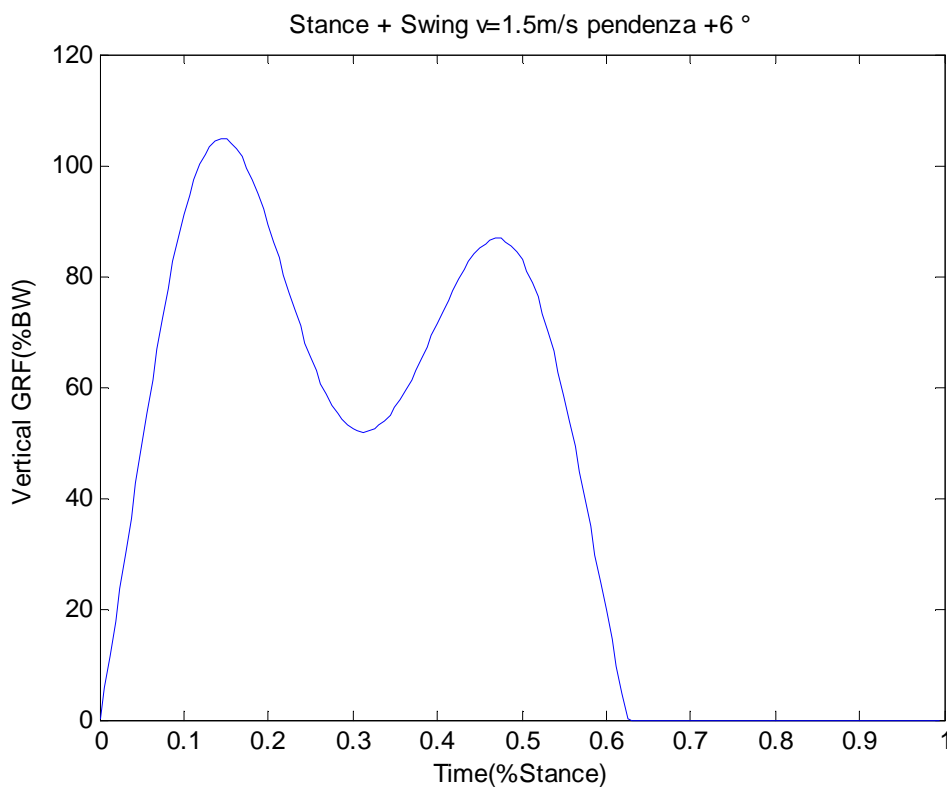


Fig.15 Forza di reazione verticale relativa alla fase di Stance+Swing alla velocità di 1.5m/s e in condizioni di pendenza di  $+6^\circ$ , si noti l'abbassamento dei due picchi rispetto alla condizione di pendenza nulla in Fig.2

Per quanto riguarda la componente antero posteriore, invece, la forma d'onda è stata modificata in funzione della pendenza partendo dalla constatazione che il picco negativo relativo al minimo diminuisce mentre il picco relativo al massimo aumenta con la pendenza.

Dai dati si è valutata, inoltre, la percentuale di accorciamento della distanza tra i primi due punti di intersezione della curva con l'asse delle ascisse e quindi il corrispondente allungamento della distanza tra il secondo e il terzo punto di intersezione. In sostanza, quindi, le coordinate di tali punti sono state modificate in funzione della pendenza.

Infine, dopo aver effettuato tutti i calcoli si è modificato il profilo della componente antero posteriore in condizioni di pendenza nulla, sostituendo nel programma Matlab i nuovi valori trovati.

Ad esempio, nel seguente grafico viene riportata la componente antero posteriore alla velocità di 1.5 m/s e in condizioni di pendenza di  $+6^\circ$

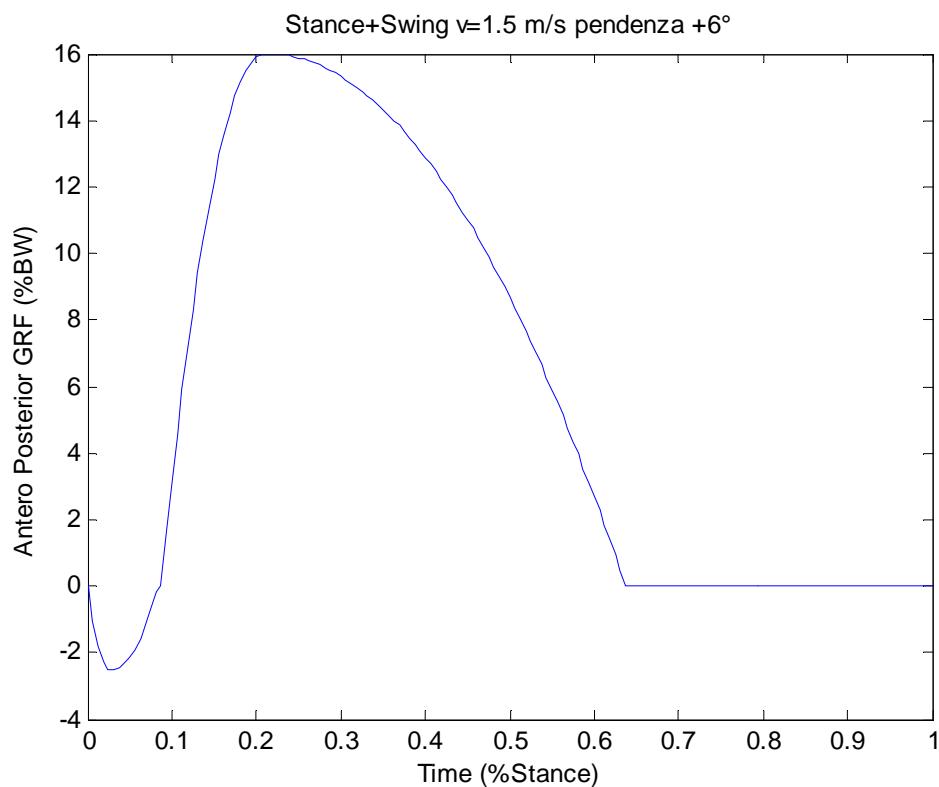




Fig.16 Componente antero posteriore della forza di reazione relativa alla fase di Stance+Swing alla velocità di 1.5m/s e in condizioni di pendenza di +6°, si noti la variazione di ampiezza dei due picchi di minimo e di massimo e la variazione di distanza tra i punti rispetto alla condizione di pendenza nulla in Fig.10

I profili totali relativi alle componenti verticale e antero posteriore, riportati in N, per un soggetto di 78Kg , sono alla fine risultati essere i seguenti:

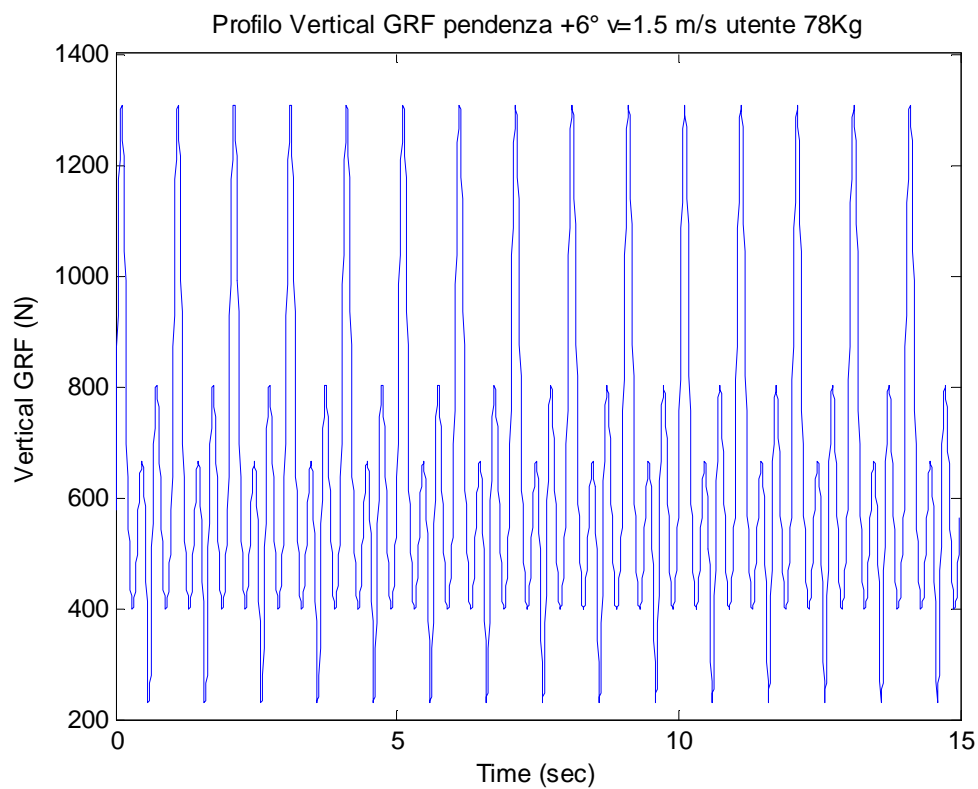


Fig.17 Profilo relativo alla componente verticale della forza di reazione per un soggetto di 78 Kg che cammina ad una velocità di 1.5 m/s in condizioni di pendenza di +6°

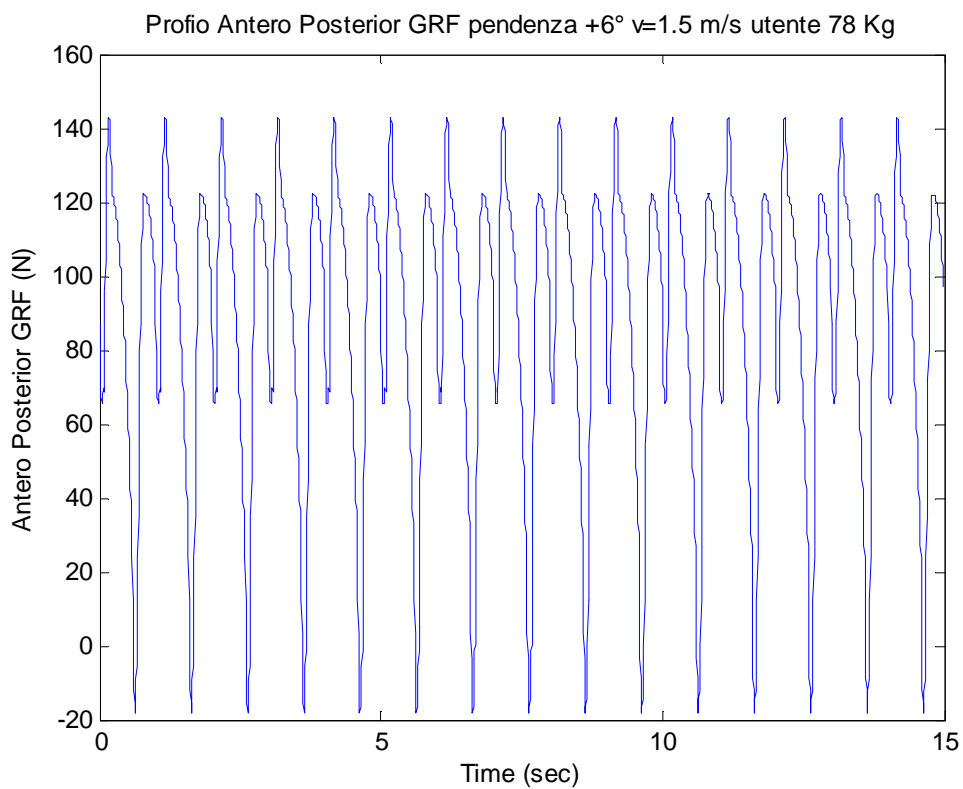


Fig.18 Profilo relativo alla componente antero posteriore della forza di reazione per un soggetto di 78 Kg che cammina ad una velocità di 1.5 m/s in condizioni di pendenza di +6°

### 3. Modello in Simulink del treadmill

#### 3.1 Schema a blocchi azionamento del treadmill

Lo schema del powertrain (parte meccanica relativa alla trasmissione del moto) di seguito proposto è composto da un rullo che, ruotando, trascina un nastro ad una velocità controllata e scelta dall'utente. Il movente del meccanismo è un motore elettrico (in questo caso un motore asincrono) il quale è controllato in velocità da un apparato elettronico (raddrizzatore + inverter) che è alimentato da rete. Tramite una trasmissione a cinghia il motore trasferisce il moto al rullo. Il tipo di controllo in velocità applicato al dispositivo è solitamente un controllo scalare noto come  $V/f$  costante, il quale permette di mantenere la velocità di rotazione costante aggiustando continuamente il rapporto tra la tensione di fase del motore e la frequenza della stessa. Seguendo questo approccio, il modello realizzato in Simulink prevede:

- l'implementazione del modello del motore asincrono tramite le equazioni del suo circuito equivalente
- il controllo della velocità a  $V/f$  costante della macchina elettrica
- l'azione di disturbo della pedata umana che si traduce fisicamente in coppia accelerante o frenante all'asse della macchina elettrica
- un modello della trasmissione meccanica tra il motore ed il nastro
- la visualizzazione delle correnti di fase e delle tensioni concatenate della macchina

Il concetto alla base della formulazione di tale modello è quindi quello di inviare una velocità di riferimento al controllo dell'azionamento per poi confrontarla con quella in uscita ed inviare l'errore ad un regolatore di velocità di tipo proporzionale integrale (noto come PI). L'uscita di questo blocco è una velocità di scorrimento la quale, sommata alla velocità meccanica in uscita dal modello, permette di annullare l'errore in velocità che il motore sta commettendo. La somma delle suddette velocità va quindi a generare la velocità del campo magnetico e quindi la frequenza di alimentazione per l'inverter. Il blocco che schematizza l'inverter alimenterà il modello del motore con tre tensioni aventi la frequenza ricavata ed il motore esplicherà un'azione correttiva in termini di correnti (quindi coppia elettromagnetica) per poter correggere la velocità al suo albero.

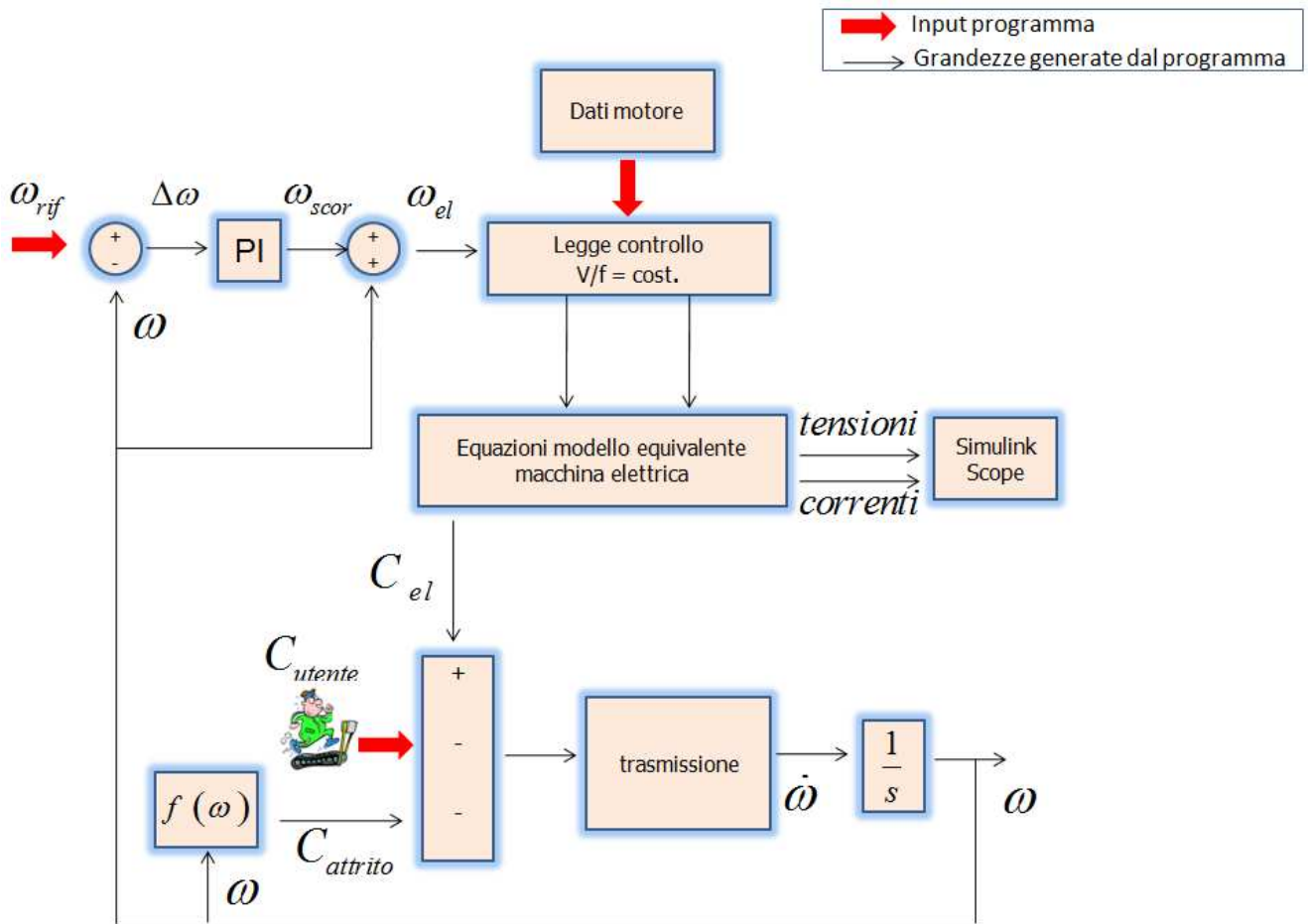


Fig.1 Schema a blocchi dell'azionamento del treadmill

### 3.2 Modellazione in Simulink

La generazione del modello in Simulink della macchina treadmill è avvenuta sostanzialmente attraverso la modellazione di 2 blocchi principali :

- controllore e inverter
- motore asincrono

Gli ingressi del modello sono due: il primo è la velocità angolare di riferimento in rad/s che corrisponde, nota la trasmissione tra il motore ed il nastro, alla velocità in km/h che l'utente sceglie di simulare; l'altro ingresso è il profilo di coppia riportato all'asse del motore elettrico

corrispondente a quella velocità, peso utente e pendenza. Le uscite della simulazione sono la velocità, coppia, correnti e tensioni di fase del motore per quel profilo di coppia che si è scelto.

### 3.2.1 Blocco controllore e inverter

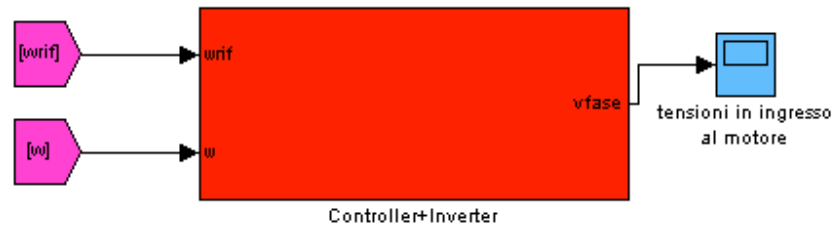


Fig.2 Rappresentazione in Simulink del blocco Controllore+Inverter

Le variabili di ingresso di questo blocco sono le velocità che devono essere confrontate dal sistema ovvero la velocità meccanica del motore e la velocità di riferimento che si desidera mantenere costante, mentre in uscita vengono fornite tre tensioni sinusoidali sfasate di 120° .

Il tipo di controllo in velocità applicato al treadmill, come si è detto, è un controllo a V/f costante, il quale permette di mantenere la velocità di rotazione costante aggiustando continuamente il rapporto tra la tensione di fase del motore e la frequenza della stessa.

### Strategia di controllo

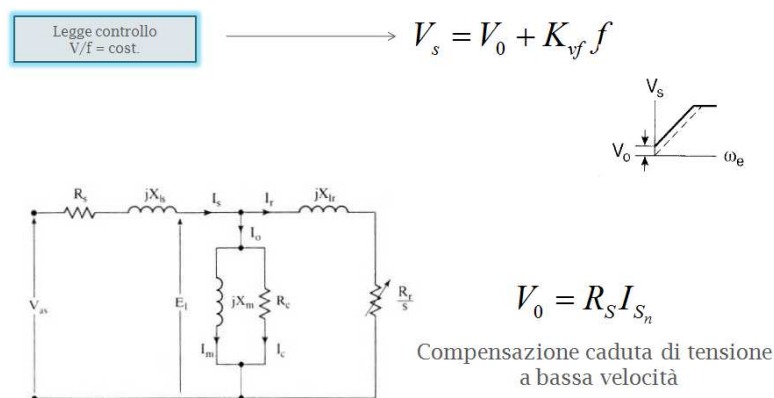


Fig.3 Strategia di controllo del motore a V/f costante

Tale legge di controllo garantisce che il flusso al traferro della macchina elettrica sia costante e pari a quello massimo. Per poter rendere valida l'equazione del controllo V/f sull'intero range di funzionamento della macchina, si è aggiunto all'equazione sopra un termine correttivo ( $V_0$ ) che rappresenta la caduta di tensione alle basse velocità dovuta alla resistenza statorica. Tale termine di compensazione, infatti, è dato dal prodotto tra la resistenza statorica e la corrente statorica che assorbe la macchina ( $R_s I_s$ )

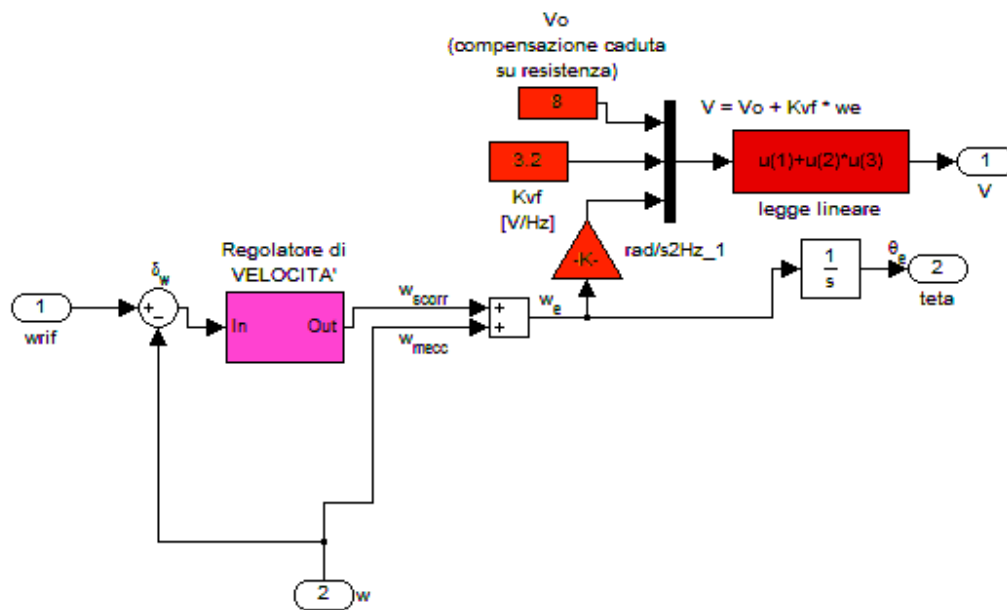


Fig.4 Implementazione in Simulink del controllore

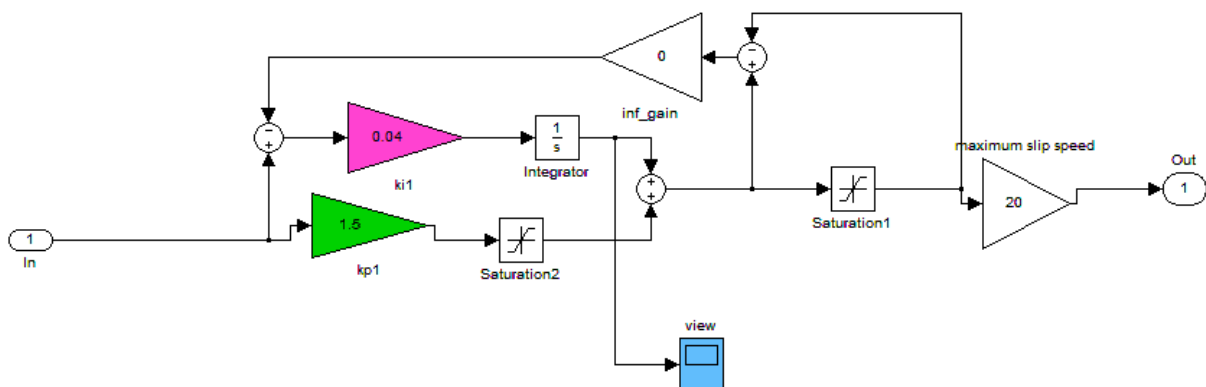


Fig.5 Implementazione del regolatore di velocità PI (Proporzionale Integrale) interno al controllore

L'apparato elettronico che controlla il motore è stato schematizzato come un inverter ideale che

genera le tre tensioni di fase che vengono poi applicate al blocco del motore. L'ampiezza e la fase di queste tre tensioni dipendono dall'errore in velocità che l'azionamento sta commettendo.

L'inverter, è un dispositivo elettronico che spesso viene utilizzato congiuntamente ad un raddrizzatore. L'elemento raddrizzatore+inverter è utilizzato per raddrizzare la corrente di rete da cui esso è alimentato e per generare le tensioni e le frequenze delle grandezze elettriche in ingresso alla macchina motrice.

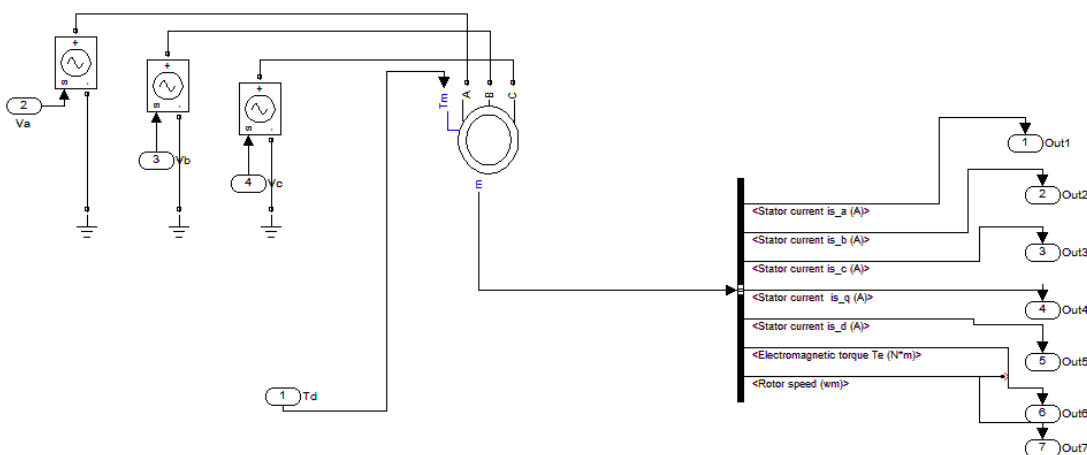


Fig.6 Blocco Simulink che rappresenta l'inverter ideale

### 3.2.2 Blocco Motore Asincrono

Il motore asincrono (o motore ad induzione) è un tipo di motore elettrico in corrente alternata in cui la velocità di rotazione dell'albero è minore della velocità di rotazione del campo magnetico generato dagli avvolgimenti di statore, ovvero non c'è sincronismo tra le due velocità. Il motore si compone di una parte fissa detta statore e una parte mobile detta rotore. Lo statore è formato da un pacco di lamierini aventi la forma di corona circolare. Le scanalature interne al pacco di lamierini statorici accolgono i conduttori (filo di rame smaltato) dell'avvolgimento trifase statorico. Il rotore è situato all'interno dello statore ed è costituito da un pacco di lamierini aventi la forma di corona circolare, con un foro interno per il passaggio dell'albero di rotazione, e scanalature esterne (cave rotoriche) per accogliere l'avvolgimento rotorico. Tra statore e rotore è presente uno spessore d'aria detto traferro di qualche decimo di millimetro per consentire la libera rotazione del rotore.

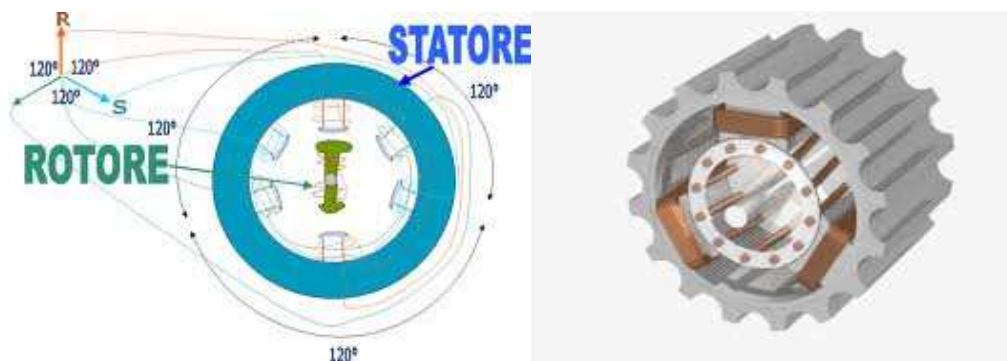


Fig.7 Motore Asincrono

### Principio di Funzionamento:

Lo statore contiene in genere un numero pari di avvolgimenti in quanto, normalmente, ce ne sono 2 per ciascuna fase di alimentazione. Un motore a tre fasi, o trifase, avrà di norma sei avvolgimenti ovvero tre coppie polari. I due avvolgimenti di ciascuna coppia polare sono collegati in serie e disposti fisicamente l'uno di fronte all'altro. Le coppie polari presentano invece uno sfasamento di  $120^\circ$  fisici ed elettrici. In conseguenza di ciò, negli avvolgimenti si verifica il passaggio di correnti che a loro volta producono un campo magnetico complessivo che ruota nello spazio. Il rotore è dotato di un certo numero di fasi di norma chiuse in corto circuito. La rotazione del campo magnetico di statore avviene ad una velocità fissa  $v_s$  legata alla frequenza di alimentazione  $f$ , detta velocità di sincronismo. La velocità di rotazione del rotore  $v_r$  sarà sempre minore di quella di sincronismo. Questa differenza fa sì che sul rotore agisca un campo magnetico che ruota ad una velocità  $v_s - v_r$ , pertanto esso sarà sede di forze elettromotrici e quindi correnti indotte (per questo motivo si parla di motore ad induzione). Evidentemente le correnti di rotore produrranno a loro volta un campo magnetico che ruota a velocità  $v_s - v_r$  rispetto al rotore, il quale ruota a velocità  $v_r$  rispetto allo statore; il risultato è che il campo di rotore ruota alla velocità  $v_s$  rispetto allo statore ed è dunque sincrono con il campo di statore. Tale condizione di sincronismo tra le due onde di campo magnetico assicura che il motore produca una coppia costante. La situazione in cui  $v_s = v_r$ , cioè velocità di rotore uguale a quella di sincronismo, è una condizione limite in cui non vi sono forze elettromotrici (e quindi correnti indotte) e dunque la coppia motrice è zero. Diversamente, la mutua interazione



attraverso i relativi campi magnetici tra le correnti di rotore e quelle di statore produce una coppia risultante netta. La velocità del rotore in condizioni nominali è sempre minore di un 3-6%; è il fenomeno dello scorrimento (slip) che consente la produzione della coppia. Dalla formula che definisce lo scorrimento è possibile esprimere la velocità di rotazione effettiva del rotore ( $v_r$ ):

$$s = \frac{v_s - v_r}{v_s}$$

dove  $s$  è lo scorrimento,  $v_s$  è la velocità di sincronismo e  $v_r$  è la velocità reale alla quale ruota il rotore. Il valore effettivo dello scorrimento dipende dal carico effettivo sul rotore. Il carico non è mai nullo perché sono sempre presenti i fenomeni di attrito tra le parti mobili e con l'aria. Questi motori sono in genere alimentati da inverter elettronici che possono variarne la velocità variando in modo coordinato la frequenza e la tensione di alimentazione ( $V/f=\text{cost}$ )

### **Equazioni dinamiche e circuito equivalente del motore asincrono**

Il funzionamento del motore ad induzione vengono utilizzate delle matrici di trasformazione che permettono di considerare il sistema non più trifase ma bifase equivalente. Il concetto di descrivere quantità relative a macchine asincrone in 2 componenti rotanti, uno allineato con l'asse di avvolgimento di campo detto componente **direct-axis** e uno perpendicolare ad esso detto componente **quadrature-axis**, è stato introdotto con la finalità di facilitare l'analisi di tali macchine. In sostanza, l'utilizzo di tale matrice permette il cambio di sistema di riferimento dagli assi a,b,c del sistema trifase reale agli assi d ,q dove d e q sono gli assi rotanti mentre l'asse 0 è l'asse di rotazione. [Fitzgerald-ed.6]

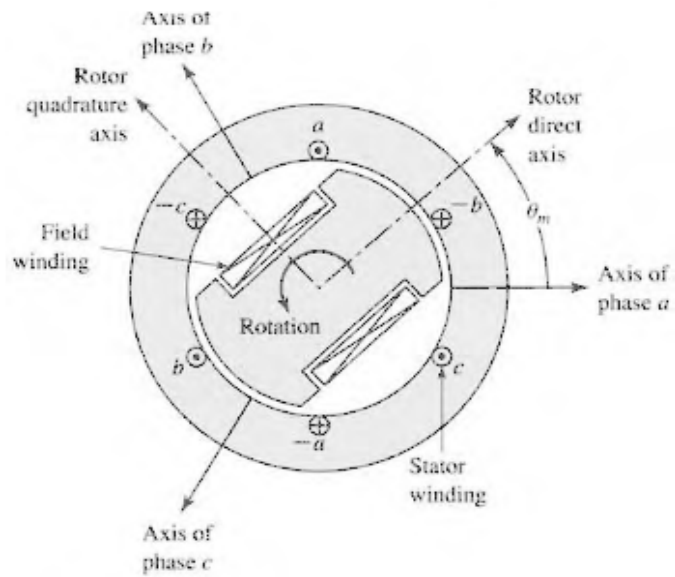


Fig.8 Cambiamento di sistema di riferimento dai tre assi a,b,c agli assi d,q,0

Il sistema di equazioni utilizzato per il cambiamento di sistema di riferimento è pertanto il seguente:

$$\begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ i_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Dove  $\theta$  è l'angolo compreso tra l'asse d e l'asse a.

Una volta effettuata tale trasformazione, il sistema di equazioni differenziali che legano le tensioni alle correnti del rotore e dello statore sono:

$$\begin{bmatrix} v_{qs}^e \\ v_{ds}^e \\ v_{qr}^e \\ v_{dr}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & \omega_s L_s & L_m p & \omega_s L_m \\ -\omega_s L_s & R_s + L_s p & -\omega_s L_m & L_m p \\ L_m p & (\omega_s - \omega_r) L_m & R_r + L_r p & (\omega_s - \omega_r) L_r \\ -(\omega_s - \omega_r) L_m & L_m p & -(\omega_s - \omega_r) L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^e \\ i_{ds}^e \\ i_{qr}^e \\ i_{dr}^e \end{bmatrix}$$

Dove

$R_s$  = resistenza statorica

$R_r$  = resistenza rotorica

$L_s$  = induttanza statorica

$L_r$  = induttanza rotorica

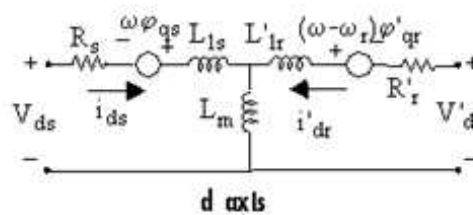
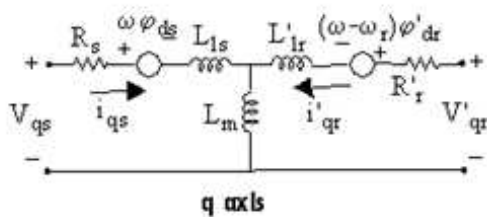
$L_m$  = induttanza di magnetizzazione

$\omega_s$  = velocità angolare dello statore

$\omega_r$  = velocità angolare del rotore

$p$  = operatore di Heaviside

Tale sistema di equazioni descrive il modello matematico del motore asincrono riferito al seguente circuito equivalente disponibile in Simulink:



$$V_{qs} = R_s i_{qs} + d\varphi_{qs}/dt + \omega \varphi_{ds}$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + d\varphi_{ds}/dt - \omega \varphi_{qs}$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + d\varphi'_{qr}/dt + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr}$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + d\varphi'_{dr}/dt - (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr}$$

$$T_e = 1.5p(\varphi_{ds} i'_{qs} - \varphi_{qs} i'_{ds})$$

where

$\omega$  — Reference frame angular velocity

$\omega_r$  — Electrical angular velocity

$$\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}$$

$$\varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr}$$

$$\varphi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs}$$

$$\varphi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds}$$

$$L_s = L_{1s} + L_m$$

$$L'_r = L'_{1r} + L_m$$

Parameter	Definition
$R_s, L_{ls}$	Stator resistance and leakage inductance
$L_m$	Magnetizing inductance
$L_s$	Total stator inductance
$V_{qs}, i_{qs}$	q axis stator voltage and current
$V_{ds}, i_{ds}$	d axis stator voltage and current
$\phi_{qs}, \phi_{ds}$	Stator q and d axis fluxes
$\omega_m$	Angular velocity of the rotor
$\Theta_m$	Rotor angular position
$p$	Number of pole pairs
$\omega_r$	Electrical angular velocity ( $\omega_m \times p$ )
$\Theta_r$	Electrical rotor angular position ( $\Theta_m \times p$ )
$T_e$	Electromagnetic torque
$T_m$	Shaft mechanical torque
$J$	Combined rotor and load inertia coefficient. Set to infinite to simulate locked rotor.
$F$	Combined rotor and load viscous friction coefficient

Parameters Specific to Wound or Single-Cage Rotor

Parameter	Definition
$L'_r$	Total rotor inductance
$R'_r, L'_{lr}$	Rotor resistance and leakage inductance
$V'_{qr}, i'_{qr}$	q axis rotor voltage and current
$V'_{dr}, i'_{dr}$	d axis rotor voltage and current
$\phi'_{qr}, \phi'_{dr}$	Rotor q and d axis fluxes

Fig.9 Circuito equivalente relativo al motore asincrono e descrizione delle grandezze utilizzate

Infine, per riportare il sistema al riferimento originario, si è utilizzata la matrice di trasformazione inversa:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\vartheta) & -\sin(\vartheta) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\vartheta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\vartheta - \frac{2}{3}\pi) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\vartheta + \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\vartheta + \frac{2}{3}\pi) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}$$

Il blocco del motore usato nel modello è quello presente nella libreria di Simulink ,esso è un modello dinamico ottenuto scrivendo le equazioni della macchina elettrica sopra descritte lungo l'asse diretto ed in quadratura.

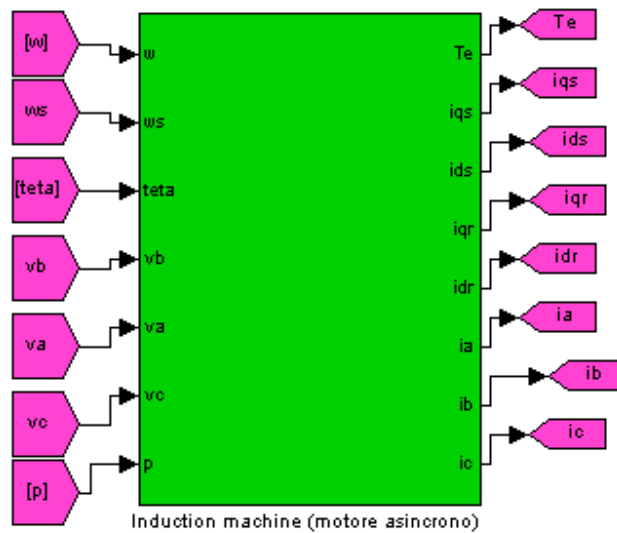


Fig.10 Rappresentazione in Simulink del blocco motore asincrono

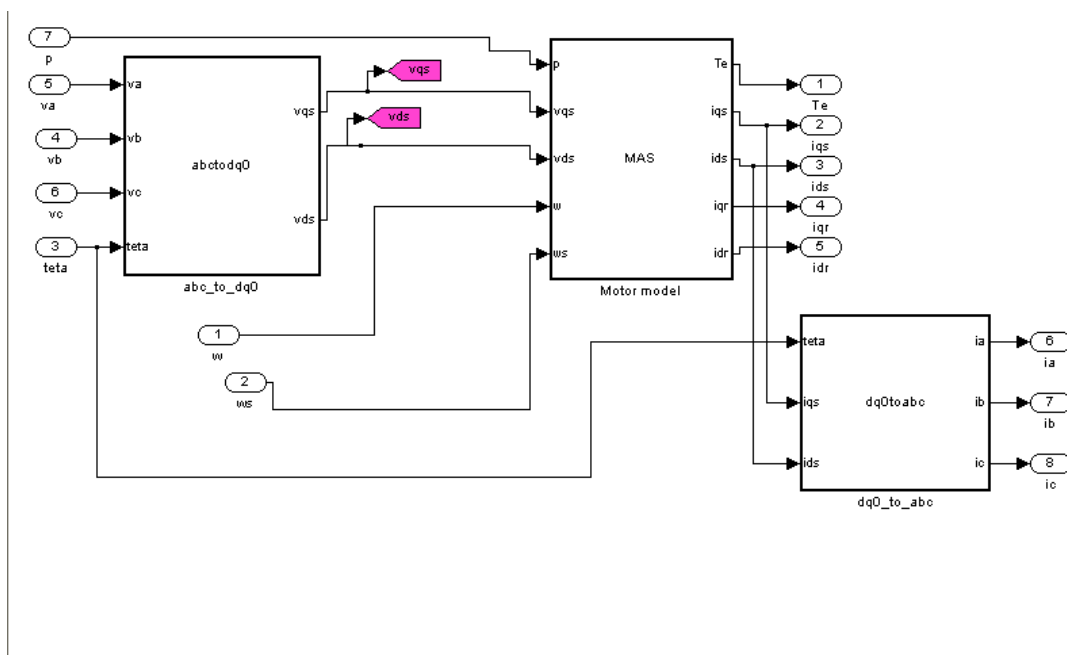


Fig.11 Rappresentazione in Simulink del blocco motore asincrono ,i vari blocchi rappresentano i sistemi di equazioni descritti in precedenza

Inoltre, nel blocco del motore già costituito in Simulink viene anche implementata al suo interno l'equazione di equilibrio all'albero risolta nella variabile  $\omega$ :



## **4. Risultati**

### ***4.1 Elaborazione dei profili di forza***

I profili di forza descritti nel capitolo 2 sono stati elaborati in modo da poter essere confrontati con i profili di coppia applicati al motore posseduti dall'azienda in cui si è svolto lo stage.

I profili già presenti in azienda erano stati acquisiti attraverso un torsionometro applicato all'asse del motore mentre un soggetto correva sul tappeto a varie velocità, per cui per rendere i profili riprodotti in questa tesi assimilabili ad essi, questi profili da me generati hanno dovuto essere riportati all'asse del motore.

A tal fine la componente verticale della forza di reazione è stata moltiplicata per il coefficiente di attrito nastro-tavola (fornito dall'azienda) e per il raggio del rullo su cui scorre il tappeto, ipotizzando perfetta aderenza tra le scarpe indossate dal soggetto e il nastro.

La componente antero posteriore è stata invece moltiplicata solamente per il raggio del rullo.

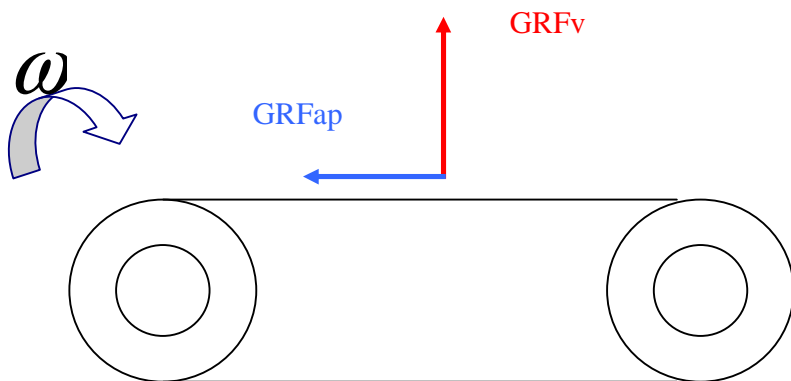


Fig.1 Schematizzazione delle forze applicate al treadmill, in rosso è indicata la componente verticale della forza di reazione mentre in blu la componente antero posteriore e la convenzione dei segni delle due componenti rispetto alla velocità di rotazione del rullo



Per ottenere, infine, il profilo di coppia totale le due componenti così modificate sono state sommate e la loro somma è stata divisa per il rapporto di trasmissione del motore (anche questo fornito dall'azienda).

I grafici seguenti mostrano i profili ottenuti per un soggetto di 78 Kg alla velocità di camminata di 1.5 m/s e alle velocità di corsa di 2.5 m/s e 6 m/s rispettivamente.

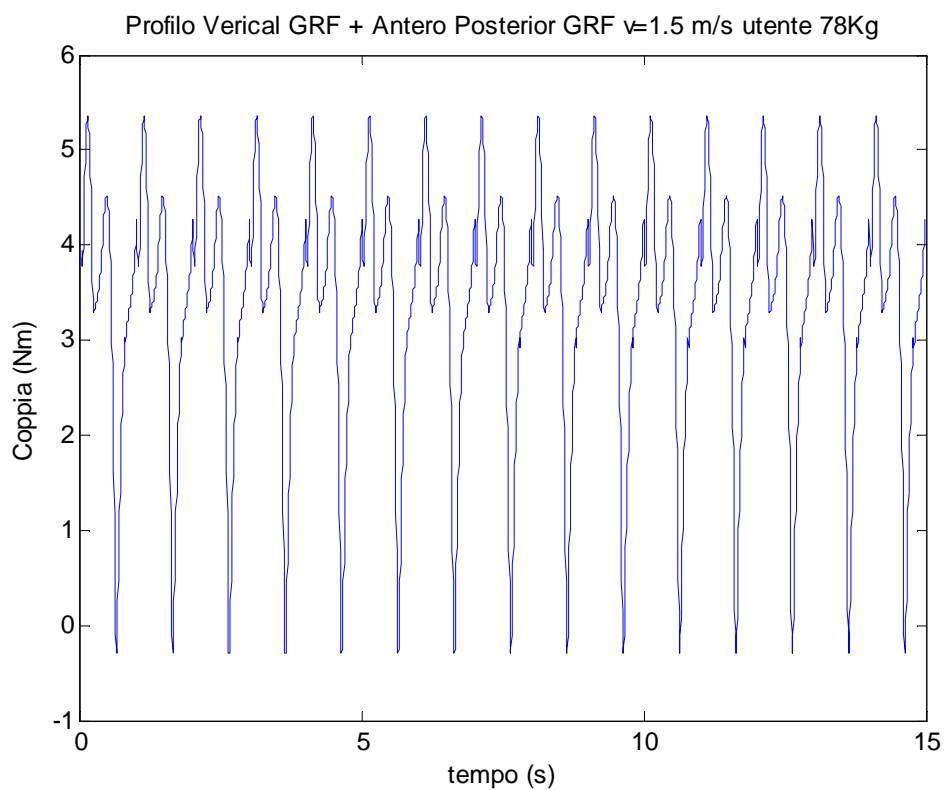


Fig.2 Profilo totale ottenuto dalla somma delle componenti verticale e antero posteriore per un soggetto di 78 Kg alla velocità di camminata di 1.5 m/s

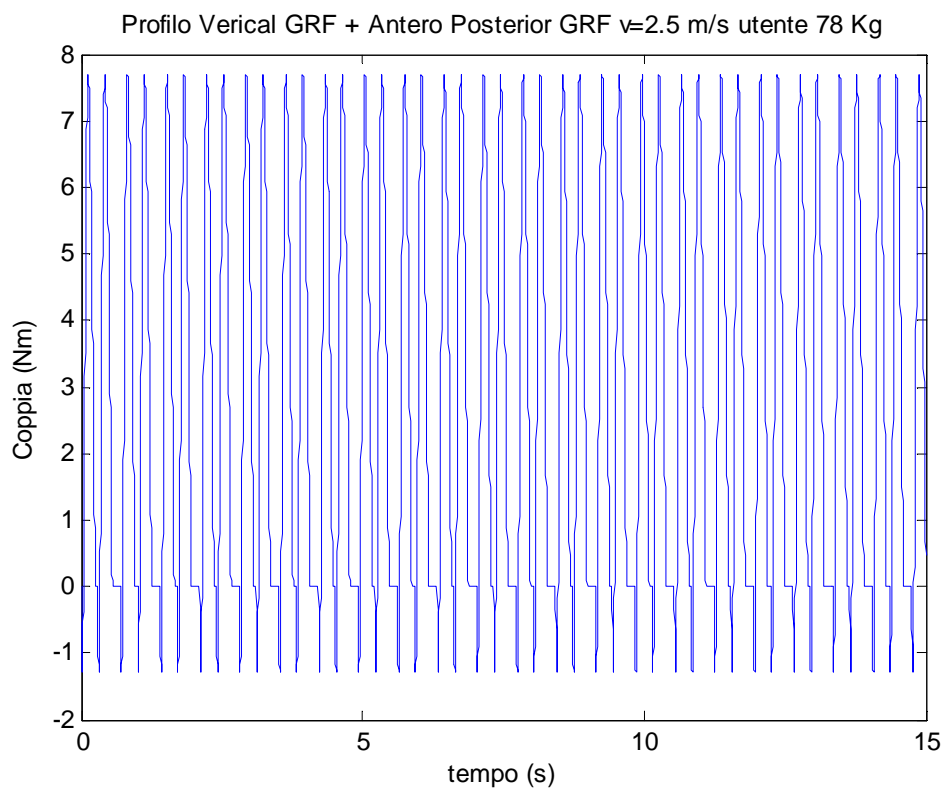


Fig.3 Profilo totale ottenuto dalla somma delle componenti verticale e antero posteriore per un soggetto di 78 Kg alla velocità di corsa di 2.5 m/s

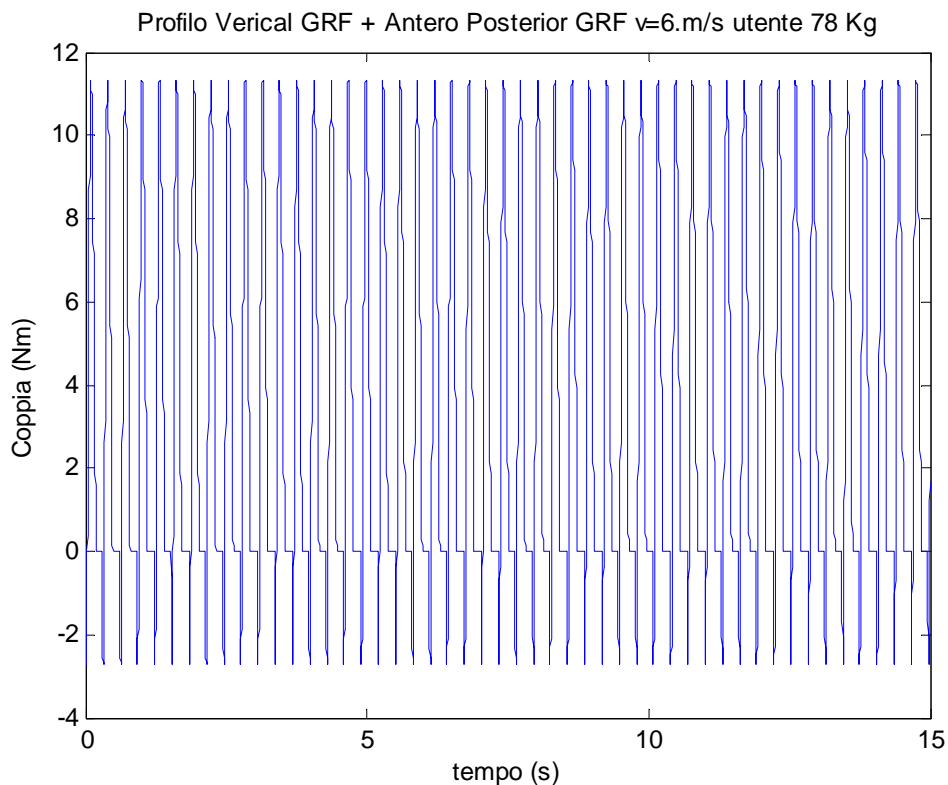


Fig.4 Profilo totale ottenuto dalla somma delle componenti verticale e antero posteriore per un soggetto di 78 Kg alla velocità di corsa di 6 m/s

Questi profili hanno mostrato un andamento molto simile a quelli acquisiti sperimentalmente in azienda, in modo molto più dispendioso, facendo correre un soggetto sul tappeto.

Pertanto i risultati ottenuti sono stati considerati soddisfacenti considerando le varie approssimazioni fatte sia in fase di generazione che nell'elaborazione dei profili stessi.

#### ***4.2 Applicazione dei profili al modello in Simulink***

I profili di coppia sono poi stati forniti in ingresso al modello del “treadmill” realizzato in Simulink ottenendo interessanti risultati.

Sono state effettuate varie simulazioni applicando profili relativi a velocità diverse: 1.5 m/s , 2.5 m/s, 6 m/s e si sono valutate le grandezze in uscita confrontandole con le grandezze misurate dal banco di test.

Delle varie grandezze fornite in uscita dal modello sono state prese in esame le tensioni concatenate e le correnti di fase perché considerate di maggiore interesse.

In seguito vengono riportati, a titolo di esempio, i risultati ottenuti dalle simulazioni relative ai profili alle velocità di 1.5, 2.5, 6 m/s rispettivamente :

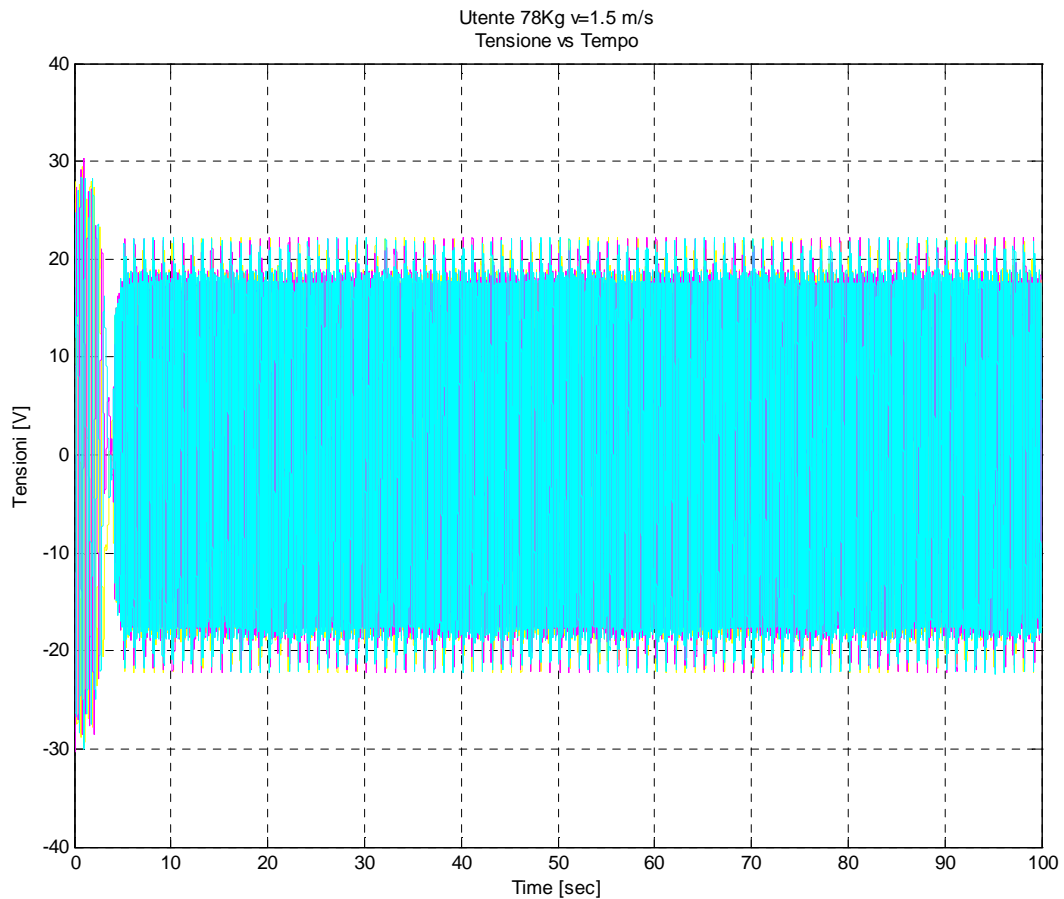


Fig.5 Tensioni concatenate ottenute in uscita dal modello in seguito all'applicazione di un profilo di coppia in ingresso relativa ad un soggetto di 78 Kg alla velocità di 1.5 m/s

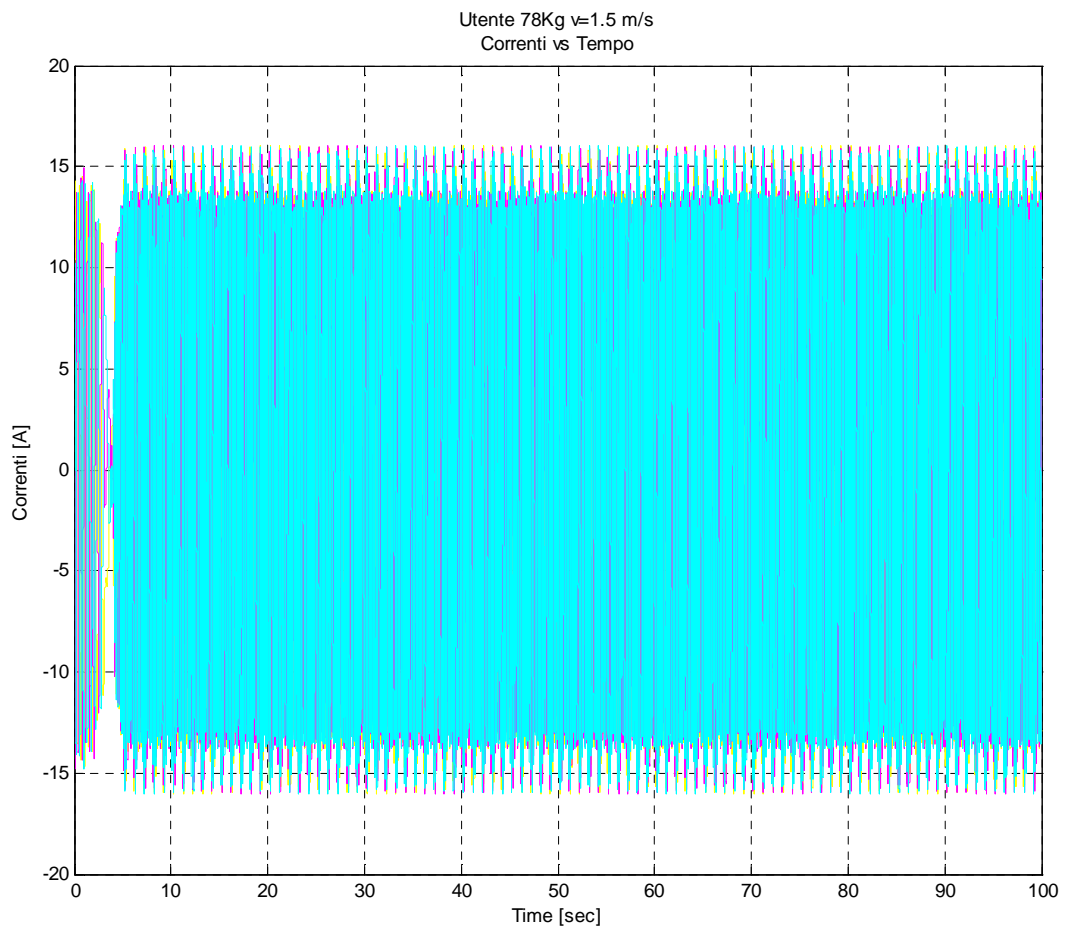


Fig.6 Correnti di fase ottenute in uscita dal modello in seguito all'applicazione di un profilo di coppia in ingresso relativa ad un soggetto di 78 Kg alla velocità di 1.5 m/s

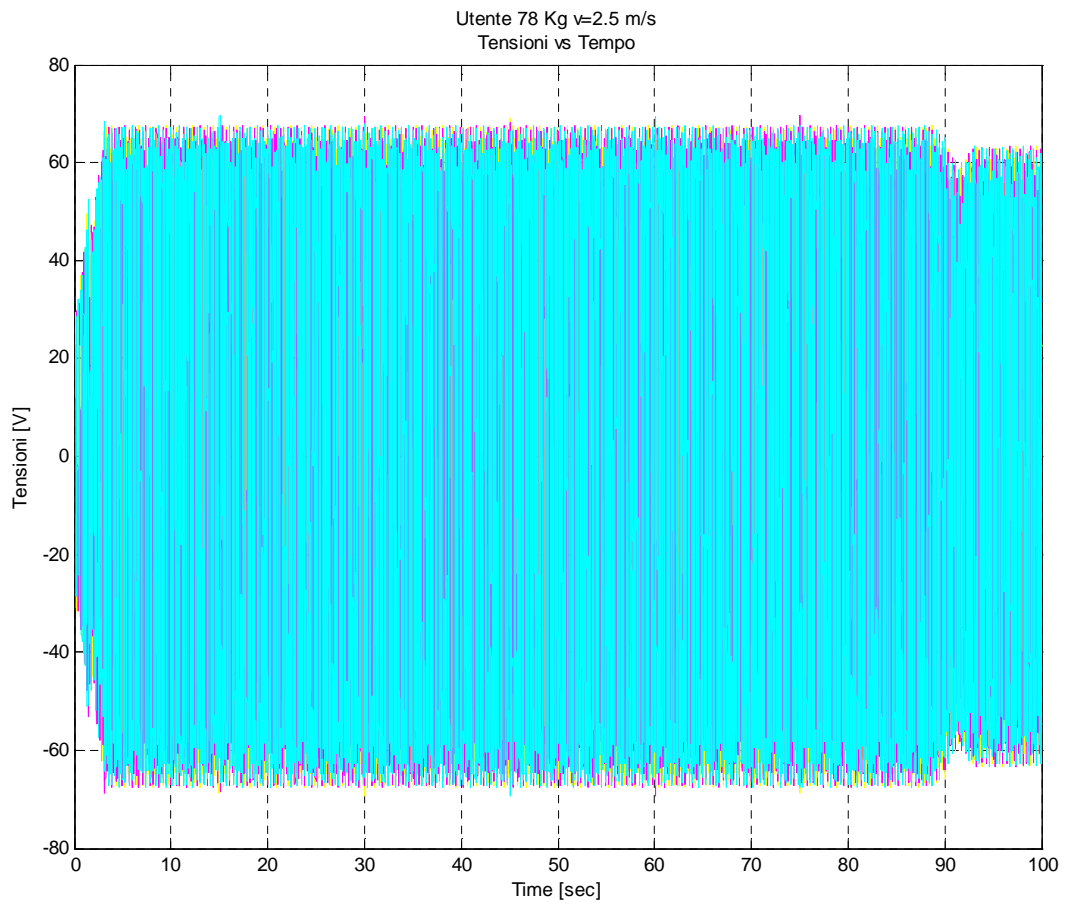


Fig.7 Tensioni concatenate ottenute in uscita dal modello in seguito all'applicazione di un profilo di coppia in ingresso relativa ad un soggetto di 78 Kg alla velocità di 2.5 m/s

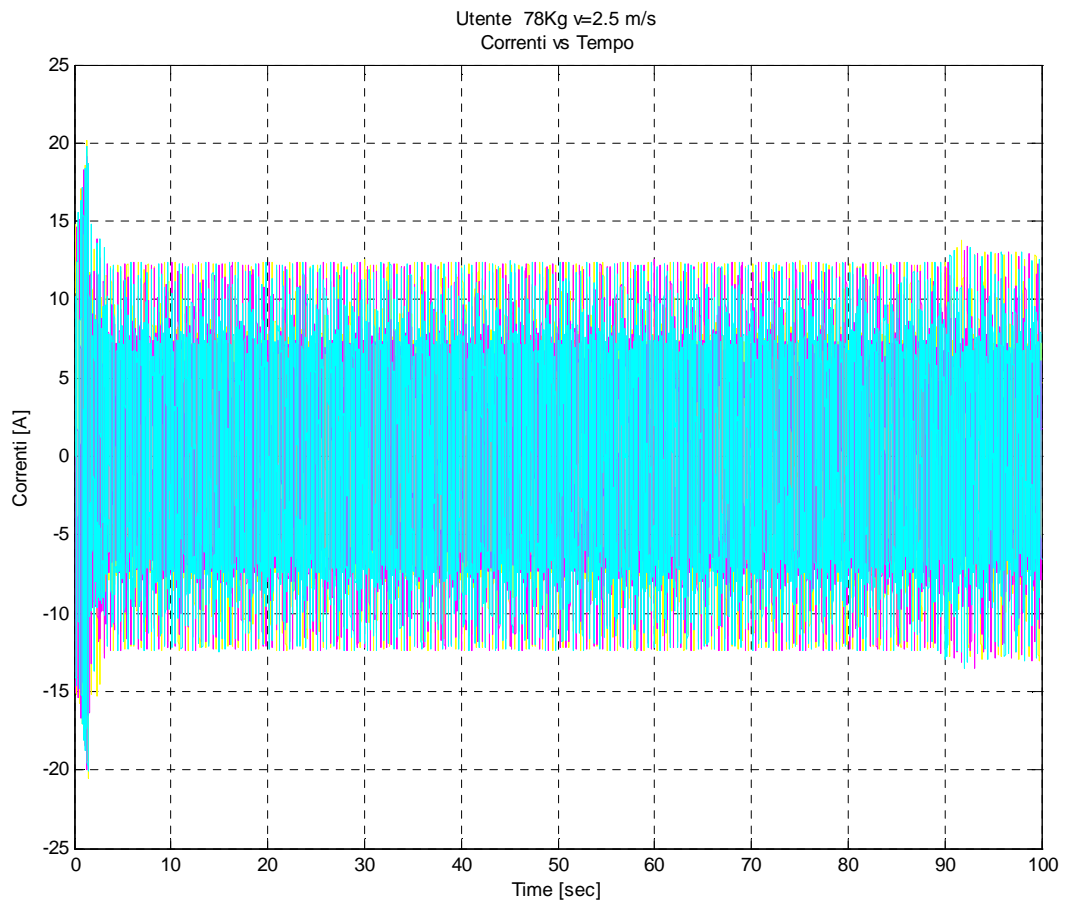


Fig.8 Correnti di fase ottenute in uscita dal modello in seguito all'applicazione di un profilo di coppia in ingresso relativa ad un soggetto di 78 Kg alla velocità di 2.5 m/s

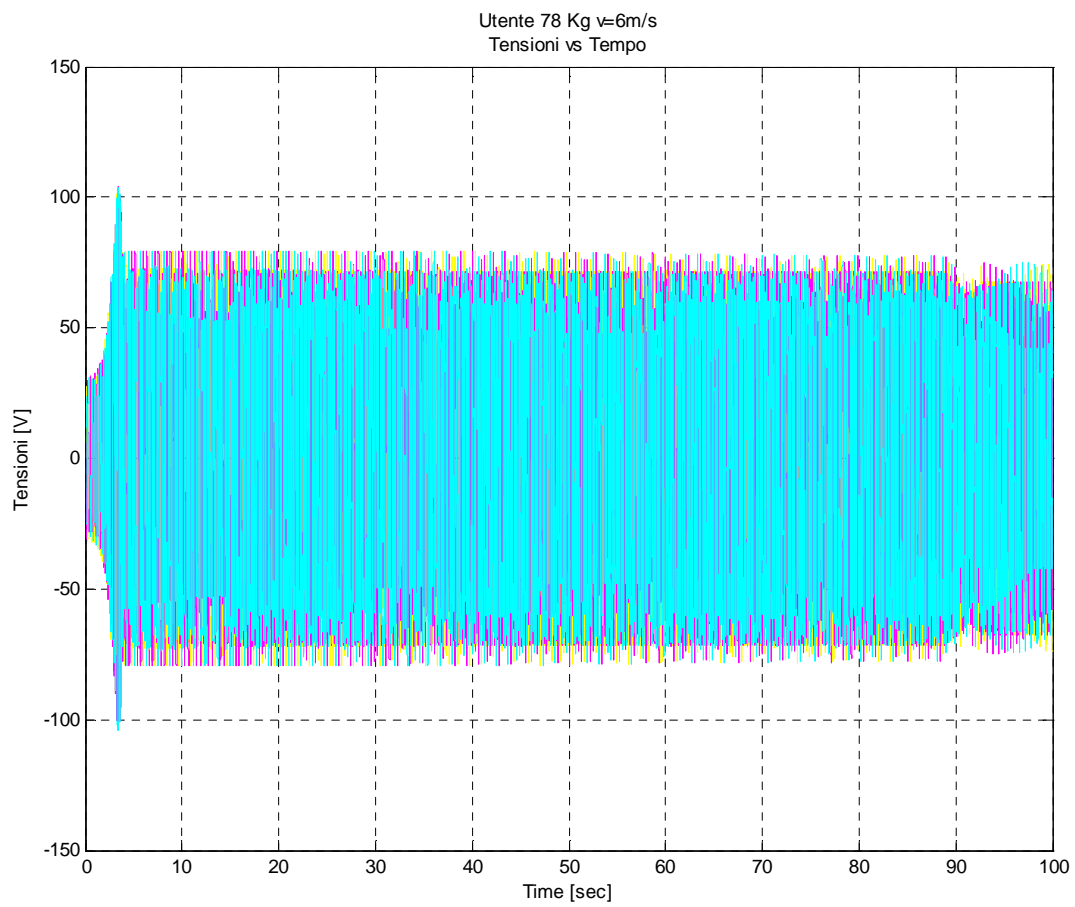


Fig.9 Tensioni concatenate ottenute in uscita dal modello in seguito all'applicazione di un profilo di coppia in ingresso relativa ad un soggetto di 78 Kg alla velocità di 6 m/s



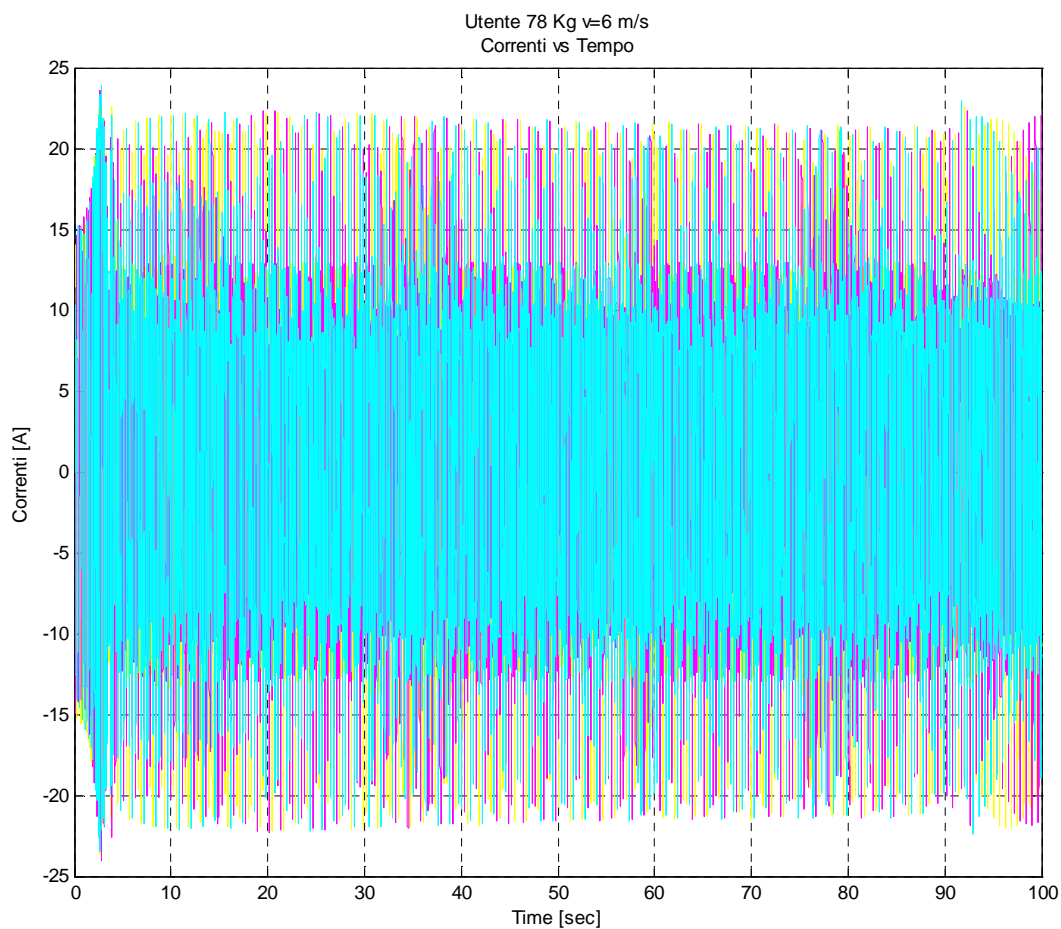


Fig.10 Correnti di fase ottenute in uscita dal modello in seguito all'applicazione di un profilo di coppia in ingresso relativa ad un soggetto di 78 Kg alla velocità di 6 m/s

Confrontando i valori di queste tensioni concatenate e delle correnti di fase con quelle rilevabili al banco è emerso che :

- le correnti di fase in uscita dal modello hanno valori confrontabili con quelle misurate a banco
- i valori delle tensioni concatenate in uscita dal modello risultano leggermente più bassi

Questo risultato si può tuttavia ritenere soddisfacente considerando il fatto che la modellazione del controllore e dell'inverter è stata fatta senza conoscere esattamente i parametri relativi all'inverter

(coperti da segreto industriale della casa produttrice). Inoltre le grandezze misurate a banco potrebbero essere state affette da errori dovuti, ad esempio, all'attrito dei cuscinetti del motore del banco di test.

## Conclusioni

In questo lavoro di tesi si sono create le premesse per poter svolgere in maniera simulata un'attività di test che l'azienda ospitante sta invece per ora svolgendo utilizzando il banco, con notevole dispendio di risorse. Grazie al modello del "treadmill" e all'applicazione di profili di coppia generati in Matlab applicati in ingresso, si ha la possibilità di svolgere invece virtualmente questa attività di test.

In seguito alle numerose simulazioni effettuate sul modello si è dedotto che esso, per ora, presenta in uscita valori confrontabili con il banco di test solamente alle basse velocità, pertanto il suo range di funzionamento risulta essere limitato. Tutto ciò è dovuto al fatto che in fase di creazione del modello in Simulink non si disponeva di parametri precisi, ad esempio per la modellazione dell'inverter, perché coperti da segreto industriale della casa costruttrice. In futuro, se l'azienda ospitante sarà disposta ad investire su questo progetto e quindi sarà in grado di fornire dati più precisi, il modello potrà essere migliorato e il suo range di funzionamento potrà essere esteso anche alle alte velocità. Considerando questa importante limitazione dei dati messi a nostra disposizione, quindi, i risultati ottenuti dal modello si possono considerare soddisfacenti.

Anche per quanto riguarda la generazione dei profili, che è la parte del progetto a cui mi sono maggiormente dedicata, si sono ottenuti dei buoni risultati soprattutto nella generazione dei profili a pendenza nulla. Alcuni di essi, infatti, si sono rivelati molto simili a quelli acquisiti in azienda con il metodo descritto in precedenza.

In futuro anche il metodo di generazione dei profili potrà essere notevolmente migliorato. In questo lavoro di tesi, infatti, i profili sono stati generati andando a modificare manualmente nel codice Matlab i parametri utilizzati nella creazione del profilo in funzione della velocità di interesse, del peso del soggetto e della pendenza del tappeto. Un possibile sviluppo futuro potrebbe invece essere la creazione di un'unica funzione Matlab che possa generare teoricamente qualunque profilo in maniera automatizzata. Questa funzione potrebbe prevedere di avere in ingresso i parametri relativi al peso del soggetto, alla velocità e alla pendenza del tappeto fornendo poi in uscita il profilo ad essi corrispondente. Le basi per realizzare questo tipo di funzione sono già presenti in questa tesi, in quanto è stata realizzata una parametrizzazione di tutte le grandezze in questione. Sono cioè stati messi in grafico gli andamenti di tutte le variabili utilizzate nella generazione del profilo in funzione

della velocità e della pendenza, e si è realizzato per ognuna di esse un fitting con il metodo dei minimi quadrati (vd. per es. cap.2 fig.7), al fine di individuare la relazione analitica che lega tali parametri alla velocità e alla pendenza. In futuro, quindi, si potrà realizzare tale funzione mettendo insieme in unico codice tutte le relazioni analitiche ottenute. Con questa funzione si potrà quindi generare in maniera automatica il profilo richiesto per qualsiasi condizione di velocità e di pendenza.



## Bibliografia

- Buczek, F.L., Cavanagh, P.R. Stance phase knee and ankle kinematics and kinetics during level and downhill running. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 1990;22, 669–677.
- Cavanagh PR. The biomechanics of lower extremity action in distance running. *Foot Ankle* 1987;7(4):197–217.
- Dick, R.W., Cavanagh, P.R. A comparison of ground reaction forces (GRF) during level and downhill running at similar speeds. *Medicine in Science and Sports* 1987; 19, S12.
- Fitzgerald,A.E., Electric Machinery - 6.Ed.
- Gage JR. An overview of normal walking. *AAOS Instructional Course Lectures* 1990;39:291–303.
- Gottschall JS, Kram R. Ground reaction forces during downhill and uphill running. *J Biomech* 2005; 38:445-52.
- Hamill, C.L., Clarke, T.E., Frederick, E.C., Goodyear, L.J., Howley, E.T. Effects of grade running on kinematics and impact force. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 1984; 16: 185.
- Hanks GA, Kalenak A. Running injuries. In: Grana WA, Kalenak A, editors. *Clinical Sports Medicine*. Philadelphia: W.B.Saunders Company, 1982:458–65.
- Hreljac, A., Marshall, R.N., Hume, P.A. Evaluation of lower extremity overuse injury potential in runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 2000;32, 1635–1641.
- Iversen, J.R., McMahon, T.A. Running on an incline. *Journal of Biomechanics Engineering* 1992; 114, 435–441.
- Keller TS, Weisberger AM, Ray JL, Hasan SS, Shiavi RG, Spengler DM. Relationship between vertical ground reaction force and speed during walking, slow jogging, and running. *Clin Biomech*. 1996;11(5):253-259.
- Klein, R.M., Potteiger, J.A., Zebas, C.J. Metabolic and biomechanical variables of two incline conditions during distance running. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 1997; 29,1625–1630.
- Mann RA, Hagy J. Biomechanics of walking, running, and sprinting. *Am J Sports Med* 1980;8(5):345–50.
- Margaria, R., 1976. *Biomechanics and Energetics of Muscular Exercise*. Clarendon, Oxford.
- Miller, B.J., Pate, R.R., Burgess, W. Foot impact force and intravascular hemolysis during distance running. *International Journal of Sports and Medicine* 1988; 9, 56–60.
- Munro CF, Miller DI, Fuglevand AJ. Ground reaction forces in running: a reexamination. *J Biomech* 1987; 20:147-55.

Novacheck TF. The biomechanics of running. *Gait Posture*. 1998;7(1):77-95.

Novacheck TF. Walking, running, and sprinting: a three-dimensional analysis of kinematics and kinetics.

*AAOS Instructional Course Lectures* 1995;44:497-506.

Ounpuu S. The biomechanics of running: a kinematic and kinetic analysis. *AAOS Instructional Course*

*Lectures* 1990;39:305-18.

Renstrom PA. Mechanism, diagnosis, and treatment of running injuries. *AAOS Instructional Course*

*Lectures* 1993;42:225-34.

Vaughan CL. Biomechanics of running gait. *Crit Rev Eng* 1984;12(1):1-48.

## Appendice



### Vertical\_GRF\_cammino.m

%Il seguente m-file genera la forza di reazione verticale relativa alla camminata a 1.5 m/s. Riceve in ingresso i parametri relativi all'ampiezza ,valor medio e varianza di tre funzioni di forma gaussiana e restituisce in uscita la forma d'onda desiderata facendo la somma delle tre funzioni

```
clc
clear all
close all
h=20;
x=[0 20 50 80 100];
y=[0 110 50 90 0];
m1=20;
P1s=110;
m2=80;
P2s=90;
t=[0:100];
P3s=50;
h1=h;
h2=h;
h3=h;
m3=(m1+m2)/2;

P1=P1s+h1+h2;
P2=P2s+h2+h1;

S1=-m1^2/(2*log((h1+h2+h3)/(P1)));
S2=-(100-m2)^2/(2*log((h2+h1+h3)/(P2)));
g1m3=P1*exp(-(m3-m1).^2/2*S1)-h1
g2m3=P2*exp(-(m3-m2).^2/2*S2)-h2
P3=P3s-h-g1m3-g2m3 ;

S3=-(m1-m3)^2/(2*log(h3/(P3)));

g1=(P1)*exp(-(t-m1).^2/(2*S1))-h1;
g2=(P2)*exp(-(t-m2).^2/(2*S2))-h2;
g3=(P3)*exp(-(t-m3).^2/(2*S3))-h3;
g30=(P3)*exp(-(0-m3).^2/(2*S3))-h3;
Gtot=g1+g2+g3-h-g30;

figure(2)
axis([0 100 0 300]);
plot(t,g1,'r-',t,g2,'g-',t,g3,'b',x,y,'o',t,Gtot,'k')
```

### Vertical\_GRF\_corsa.m

%Il seguente programma genera la forza di reazione verticale relativa alla corsa a 2.5 m/s. Riceve in ingresso i parametri relativi all'ampiezza, valor medio e varianza di due funzioni di forma gaussiana e restituisce in uscita la forma d'onda desiderata facendo la somma delle due funzioni

```
clc
clear all
close all
P1=136;
P2=90;
x=[0 45 100];
y=[0 226 0];
t=[0:100];
t1=[0:100];
t2=[0:100];
h=20;
h1=h;
h2=h;
m1=45;
m2=m1;
P3=P1+P2;
S1=-m1^2/(2*log(h1/(P3+h1)))
S2=-(100-m2)^2/(2*log(h/(P3+h2)))
g1=(P3+h1)*exp(-(t1-m1).^2/(2*S1))-h1;
g2=(P3+h2)*exp(-(t2-m2).^2/(2*S2))-h2;

figure
plot(x,y,'ro',t1,g1,'r',t2,g2,'g')
axis([0 100 0 300])

figure
plot(x,y,'ro',t1(1:m1),g1(1:m1),'r',t2(m1:end),g2(m1:end),'g')
axis([0 100 0 300])

figure
G=[g1(1:m1) g2(m1+1:end)];
plot(x,y,'ro',t,G)
axis([0 100 0 300])
```

%I seguenti tre m-file permettono di graficare il tempo relativo alla durata dello 'stride' in funzione della velocità. Attraverso l'utilizzo delle function 'fcostol' e 'esponenziale' viene implementato il fitting ai minimi quadrati e ,pertanto,viene ricavata la relazione analitica che lega il tempo di 'stride' alla velocità

#### Grafico\_t\_stride\_v.m

```
clc
clear all
close all
global x y
x=[1.2 3.2 3.9 9];%v
y=[1 0.66 0.61 0.53];%tg
plot(x,y,x,y,'ro')
title('Grafico Tempo Stride-velocità')
xlabel('velocità')
ylabel('Tempo Stride')
hold on
teta0(1)=0;
teta0(2)=1.2;
teta0(3)=0;

t=[1:0.1:10];
[teta,fval]=fminsearch('fcostol',teta0);
fval
F=esponenziale(teta);
plot(t,F,'g',x,y,'ro')
axis([0 9 0 1])
```

#### fcostol.m

```
function [F]=fcostol(teta)
global x y
k1=teta(1);
k2=teta(2);
k3=teta(3);
t=x;
Y=exp(-(k1*(t-k2)))+k3;
```

```
e=Y-y;  
F=e*e';
```

### esponenziale.m

```
function [Y]=esponenziale(teta)  
global x  
k1=teta(1);  
k2=teta(2);  
k3=teta(3);  
  
t=[1:0.1:10];  
Y=exp(-(k1*(t-k2)))+k3;
```

### Vertical\_AnteroPosterior\_GRF\_v\_1\_5\_78kg.m

%Il seguente m-file genera il profilo di coppia riportato all'asse del motore relativo alla camminata a 1.5 m/s per un soggetto di 78 Kg. Tale profilo è ottenuto sommando le componenti verticale e antero posteriore della forza di reazione

```
clc  
clear all  
close all  
h=20;  
x=[0 20 50 80 100];  
y=[0 110 50 90 0];  
  
%Vertical_GRF  
m1=20;  
P1s=110;  
m2=80;  
P2s=90;  
t=[0:100];  
P3s=50;  
h1=h;  
h2=h;  
h3=h;  
m3=(m1+m2)/2;  
tau=1.93;  
P1=P1s+h1+h2;  
P2=P2s+h2+h1;  
S1=-m1^2/(2*log((h1+h2+h3)/(P1)));  
S2=-(100-m2)^2/(2*log((h2+h1+h3)/(P2)));  
g1m3=P1*exp(-(m3-m1).^2/2*S1)-h1  
g2m3=P2*exp(-(m3-m2).^2/2*S2)-h2  
P3=P3s-h-g1m3-g2m3 ;
```

```

S3=- (m1-m3)^2/(2*log(h3/(P3)));

g1=(P1)*exp(-(t-m1).^2/(2*S1))-h1;
g2=(P2)*exp(-(t-m2).^2/(2*S2))-h2;
g3=(P3)*exp(-(t-m3).^2/(2*S3))-h3;
g30=(P3)*exp(-(0-m3).^2/(2*S3))-h3;
Gtot=g1+g2+g3-h-g30;

figure(2)
axis([0 100 0 300]);
plot(t,g1,'r-',t,g2,'g-',t,g3,'b',x,y,'o',t,Gtot,'k')

figure(3)
t=[0:1/160:1];
t1=0:100;
g1=(P1)*exp(-(t1-m1).^2/(2*S1))-h1;
g2=(P2)*exp(-(t1-m2).^2/(2*S2))-h2;
g3=(P3)*exp(-(t1-m3).^2/(2*S3))-h3;
g30=(P3)*exp(-(0-m3).^2/(2*S3))-h3;
Gtot=g1+g2+g3-h-g30;

Gtot=[Gtot zeros(1,59)];

plot(t(1:end-1),Gtot)

t=[0:1/160:15-1/160];
Gdx=[Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot
Gtot];
figure(4)

plot(t,Gdx)
title('Piede dx')

figure(5)

Gsx=[Gtot(67:end) Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot
Gtot Gtot Gtot(1:66) ];
plot(t,Gdx,t,Gsx,'r')
title('Piede dx e Piede sx')
axis([0 15 0 120])

P=78*9.81;
F=(Gdx+Gsx)*P/100;
C=F*0.16*0.05; %Componente Verticale moltiplicata per il coefficiente d'attrito
e
                Per il raggio del rullo

figure(5)
plot(t,C)
title('Profilo Vertical GRF')

                %Antero_Posterior_GRF
x0=0;
y0=0;
x1=10;
y1=-10;

```

```

x2=30;
y2=0;
x3=52;
y3=10;
x4=100;
y4=0;
xp=x0;
yp=y0;
xv=x1;
yv=y1;
a1=(yp-yv)/(xp-xv)/(xp-xv);
b1=-2*a1*xv;
c1=yv+a1*xv*xv;

xp1=[xp:1:xv];
P1=a1*xp1.^2+b1*xp1+c1;
plot(xp1,P1)
hold on
xp=x2;
yp=y2;
xv=x1;
yv=y1;
a2=(yp-yv)/(xp-xv)/(xp-xv);
b2=-2*a2*xv;
c2=yv+a2*xv*xv;
xp2=[xv:1:xp];
P2=a2*xp2.^2+b2*xp2+c2;
plot(xp2,P2)
xp=x2;
yp=y2;
xv=x3;
yv=y3;
a3=(yp-yv)/(xp-xv)/(xp-xv);
b3=-2*a3*xv;
c3=yv+a3*xv*xv;
xp3=[xp:1:xv];
P3=a3*xp3.^2+b3*xp3+c3;
plot(xp3,P3)
xp=x4;
yp=y4;
xv=x3;
yv=y3;
a4=(yp-yv)/(xp-xv)/(xp-xv);
b4=-2*a4*xv;
c4=yv+a4*xv*xv;
xp4=[xv:1:xp];
P4=a4*xp4.^2+b4*xp4+c4;
plot(xp4,P4)
Ftot=[P1 P2 P3 P4];
xtot=[xp1 xp2 xp3 xp4];
figure (6)
plot(x1,y1,'ro',x2,y2,'ro',x3,y3,'ro',x4,y4,'ro',xp1,P1,'b',xp2,P2,'m',xp3,P3,'g',xp4,P4,'r')
figure(7)
plot(xtot,Ftot)

```

```

t=[0:1/160:1];
Ftot=[Ftot zeros(1,57)];
plot(t,Ftot)

t=[0:1/160:15-1/160];
Fdx=[Ftot(2:end) Ftot(2:end) Ftot(2:end) Ftot(2:end) Ftot(2:end) Ftot(2:end)
Ftot(2:end) Ftot(2:end) Ftot(2:end) Ftot(2:end) Ftot(2:end) Ftot(2:end)
Ftot(2:end) Ftot(2:end) Ftot(2:end)];
figure(8)
plot(t,Fdx)
title('piede dx')

figure(9)
Fsx=[Ftot(67:end) Ftot(2:end) Ftot(2:end) Ftot(2:end) Ftot(2:end) Ftot(2:end)
Ftot(2:end) Ftot(2:end) Ftot(2:end) Ftot(2:end) Ftot(2:end) Ftot(2:end)
Ftot(2:end) Ftot(2:end) Ftot(2:end) Ftot(2:66) ];
plot(t,Fdx,t,Fsx,'g')
title('Piede dx e Piede sx')

figure(10)
P=78*9.81;%Utente 78Kg
Fap=((Fdx+Fsx)*P/100)*0.05;%Componente Antero Posteriore moltiplicata per il
raggio
plot(t,Fap) %del rullo
title('Profilo Antero Posterior GRF')

figure(11)
P=(C+Fap)/tau; %Coppia totale divisa per il rapporto di trasmissione della
macchina
plot(t,P)
title('Profilo Vertical GRF + Antero Posterior GRF')
xlabel('tempo (s)')
ylabel('Coppia (Nm)')

```

### Profilo\_pendenza\_6\_v2\_5\_130kg.m

%Il seguente m-file implementa il profilo di coppia relativo alla velocità di corsa di 2.5 m/s per un soggetto di 130 Kg in condizioni di pendenza di +6°. È stato ottenuto sommando le componenti verticale e antero posteriore relative alla suddetta pendenza riportate all'asse del motore.

```

clc
clear all
close all
tau=1.93;
P1=129;
P2=37;
x=[0 45 100];
y=[0 166 0];
t=[0:100];
t1=[0:100];

```

```

t2=[0:100];
h=80;
h1=h;
h2=h;
m1=46;
m2=m1;
P3=P1+P2;
S1=-m1^2/(2*log(h1/(P3+h1)))
S2=-(100-m2)^2/(2*log(h/(P3+h2)))
g1=(P3+h1)*exp(-(t1-m1).^2/(2*S1))-h1;
g2=(P3+h2)*exp(-(t2-m2).^2/(2*S2))-h2;
figure(1)
plot(x,y,'ro',t1,g1,'r',t2,g2,'g')
axis([0 100 0 300])
figure(2)
plot(x,y,'ro',t1(1:m1),g1(1:m1),'r',t2(m1:end),g2(m1:end),'g')
axis([0 100 0 300])
figure(3)
G=[g1(1:m1) g2(m1+1:end)];
plot(x,y,'ro',t,G)
axis([0 100 0 300])
figure(4)
Gtot=[G zeros(1,180)];
t=[0:1/400:0.7];
plot(t,Gtot)

t=[0:1/400:15];
Gdx=[Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot
Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot(1:end-181)];
figure(5)
plot(t,Gdx)
title('piede dx')

figure(6)
Gsx=[ zeros(1,120) Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot
Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot Gtot(1:end-20) ];
plot(t,Gdx,t,Gsx,'r')
title('Piede dx e Piede sx')

figure(7)
P=130*9.81;%peso in Newton
F=(Gdx+Gsx)*P/100;

plot(t,F)
title('Profilo Corsa')

axis([0 15 0 2500])
C=F*0.16*0.05;

figure(8)
plot(t,C)
title('Profilo Vertical GRF Corsa 2.5 m/s')

x0=0;
y0=0;

```



```

x1=10;
y1=-3.125;
x2=12.5;
y2=0;
x3=52;
y3=18.72;
x4=100;
y4=0;
xp=x0;
yp=y0;
xv=x1;
yv=y1;
a1=(yp-yv)/(xp-xv)/(xp-xv);
b1=-2*a1*xv;
c1=yv+a1*xv*xv;
xp1=[xp:1:xv];
P1=a1*xp1.^2+b1*xp1+c1;
plot(xp1,P1)
hold on

xp=x2;
yp=y2;
xv=x1;
yv=y1;
a2=(yp-yv)/(xp-xv)/(xp-xv);
b2=-2*a2*xv;
c2=yv+a2*xv*xv;
xp2=[xv:1:xp];
P2=a2*xp2.^2+b2*xp2+c2;
plot(xp2,P2)

xp=x2;
yp=y2;
xv=x3;
yv=y3;
a3=(yp-yv)/(xp-xv)/(xp-xv);
b3=-2*a3*xv;
c3=yv+a3*xv*xv;
xp3=[xp:1:xv];
P3=a3*xp3.^2+b3*xp3+c3;
plot(xp3,P3)

xp=x4;
yp=y4;
xv=x3;
yv=y3;
a4=(yp-yv)/(xp-xv)/(xp-xv);
b4=-2*a4*xv;
c4=yv+a4*xv*xv;
xp4=[xv:1:xp];
P4=a4*xp4.^2+b4*xp4+c4;
plot(xp4,P4)

Ftot=[P1 P2 P3 P4];

```

```

xtot=[xp1 xp2 xp3 xp4];

figure(9)
plot(xtot,Ftot)
Ftot=[Ftot zeros(1,178)];
t=[0:1/400:0.7];
figure(10)
plot(t,Ftot)

t=[0:1/400:15];
Fdx=[Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot
Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot(1:end-181)];
figure(11)

plot(t,Fdx)
title('piede dx')

figure(12)

Fsx=[ zeros(1,120) Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot
Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot Ftot(1:end-20) ];
plot(t,Fdx,t,Fsx,'r')
title('Piede dx e Piede sx')
figure(13)
P=130*9.81;%Utente 130Kg
Fap=((Fdx+Fsx)*P/100)*0.05;
plot(t,Fap)
title('Profilo Antero Posterior GRF')

figure(14)
P=(C-Fap)/tau;
plot(t,P)
title('Profilo Verical GRF - Antero Posterior GRF pendenza +6 v=2.5 m/s 130Kg')
xlabel('tempo (s)')
ylabel('Coppia (Nm)')

```