

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Medicina

Corso di Laurea Magistrale in Scienze e Tecniche dell'Attività Motoria Preventiva e
Adattata

Tesi di Laurea

**EFFETTO DI QUATTRO SETTIMANE DI ALLENAMENTO CON
TAVOLETTE BASCULANTI SU MECCANISMI DI CONTROLLO
POSTURALE ED EQUILIBRIO**

Relatore: Prof. Marcolin Giuseppe

Laureando: Schiavo Nicolò

N° di matricola: 2027421

Anno Accademico 2022/2023

INDICE

RIASSUNTO.....	1
Capitolo 1 INTRODUZIONE.....	3
1.1 BACKGROUND DELLO STUDIO.....	3
1.2 OBIETTIVO DELLO STUDIO.....	7
Capitolo 2 MATERIALI E METODI.....	9
2.1 I PARTECIPANTI.....	9
2.2 STRUMENTAZIONE.....	9
2.3 PROTOCOLLO SPERIMENTALE.....	13
Capitolo 3 ANALISI DATI.....	21
3.1 PRESTAZIONE DI EQUILIBRIO.....	21
3.2 CONTROLLO MOTORIO.....	24
3.3 ANALISI STATISTICA.....	26
Capitolo 4 RISULTATI.....	27
4.1 PRESTAZIONI DI EQUILIBRIO SPECIFICO.....	27
4.2 PRESTAZIONI DI EQUILIBRIO ASPECIFICO.....	29
4.3 CONTROLLO MOTORIO.....	31
Capitolo 5 DISCUSSIONE E CONCLUSIONE.....	35
BIBLIOGRAFIA.....	39

RIASSUNTO:

Background: Essere in possesso di un buon controllo posturale, sia in condizioni statiche che dinamiche, è un elemento fondamentale da un punto di vista della prestazione sportiva, ma anche, e soprattutto, nella vita di tutti i giorni, come ad esempio per ridurre il rischio di cadute o di infortuni. Perciò, è importante andare a studiare le possibilità di allenamento e di miglioramento di questi meccanismi di controllo posturale ed equilibrio.

Obiettivo dello studio: Lo studio vuole valutare l'effetto di un allenamento su tavolette basculanti sulle prestazioni di equilibrio statico e dinamico e sui meccanismi di controllo coinvolti

Materiali e metodi: 8 ragazzi e ragazze sani di età compresa tra i 18 e i 35 anni hanno partecipato a questo studio (M=5; F=3; media 25,1 anni). Il protocollo di allenamento è durato quattro settimane e prevedeva tre sedute di allenamento a settimana, della durata di circa 15 minuti l'una. I soggetti sono stati testati due volte, all'inizio e al termine delle quattro settimane di allenamento. La batteria di test iniziale, che serviva a quantificare capacità di controllo posturale espressa in quel momento, è stata svolta su una pedana dinamometrica ed era composta da quattro diverse tipologie di test: un test di equilibrio statico; due test di equilibrio dinamico, con l'utilizzo di due tavolette basculanti, di diversa difficoltà, posizionate sopra la pedana di forza; infine, un test di equilibrio dinamico, che prevedeva lo spostamento improvviso e casuale della pedana ove erano posizionati. Per l'analisi dei dati sono stati considerati numerosi parametri di variabilità del CoP. Inoltre, nelle prove con le tavolette basculanti, è stato usato un sensore inerziale, utilizzato per analizzare le oscillazioni antero-posteriori delle suddette tavolette.

Risultati: L'allenamento ha portato ad un miglioramento della prestazione di equilibrio e dei meccanismi di controllo e ad un maggiore automatismo del gesto. Inoltre si è verificato un transfer nel compito specifico.

Conclusioni: I risultati hanno dimostrato che quattro settimane di allenamento su tavoletta basculante possono portare a dei miglioramenti significativi dell'equilibrio e dei meccanismi di controllo posturale. Inoltre, tale allenamento risulta sufficiente per creare un transfer in un compito specifico, ma non in un compito aspecifico

ABSTRACT:

Background: Having good postural control, both in static and dynamic conditions, is a fundamental element from the point of view of sports performance but, especially in everyday life, as an excellent resource to reduce the risk of falls or injuries. Therefore, it is important to study the possibilities of training and improvement of these postural control and balance mechanisms.

Purpose: The present study aimed to evaluate the effect of training on unstable boards on static and dynamic postural control and on control mechanisms;

Methods: Eight healthy boys and girls aged between 18 and 35 years took part to this study (M=5; F=3; mean 25.1 years). The training protocol lasted four weeks and included three training sessions per week, lasting about 15 minutes each one. The subjects were tested twice, at the beginning and at the end of the four weeks of training. The initial battery test, used to quantify postural control capacity expressed at that time, was performed over a dynamometric platform and consisted of four different types of tests: a static balance test; two dynamic balance tests with the use of two unstable boards of different difficulty, positioned over the strength platform; lastly, a dynamic balance test, which involved the sudden and random movement of the platform on which the subjects were positioned. For the data analysis, numerous parameters of variability of the CoP were considered. Furthermore, in the unstable boards tests, an inertial sensor was used, in order to analyze the antero-posterior oscillations of the aforementioned boards.

Results: The training led to an improvement of the balance performance and control mechanism and to a greater automatism of the gesture. Furthermore, there was a specific task transfer.

Conclusions: The results demonstrate that four weeks of unstable board training can lead to significant improvements in balance and postural control mechanism. Furthermore, such training is sufficient to induce a transfer into a specific task, but not into a nonspecific task.

CAPITOLO 1.

INTRODUZIONE

1.1 BACKGROUND DELLO STUDIO

1.1.2 controllo posturale ed equilibrio

La capacità di stare in piedi, di camminare e di svolgere le normali attività quotidiane in modo sicuro, dipende da una complessa interazione di diversi sottosistemi interagenti tra loro, compresi il sistema scheletrico, neuromuscolare e sensoriale (R Johansson; M Magnusson 1991). Pertanto, il controllo posturale non è più considerato come una semplice sommatoria di riflessi, bensì come un'abilità motoria complessa, derivata dall'interazione di diversi sistemi sensomotori. Tuttavia, questa articolata interazione multifattoriale non è ancora chiaramente e totalmente compresa (Joseph E. Barton, Anindo Roy, John D. Sorkin 2016). I principali sistemi sensoriali adibiti all'invio di informazioni, al sistema nervoso centrale, riguardanti la posizione del corpo nello spazio, sono il sistema visivo, il sistema vestibolare e il sistema somatosensoriale. I due principali obiettivi del controllo posturale sono l'orientamento posturale e l'equilibrio posturale (Horak 2006). L'orientamento posturale comporta il controllo attivo dell'allineamento e del tono del corpo rispetto alla gravità, alla superficie d'appoggio, all'ambiente esterno e agli input interni. L'equilibrio posturale, invece, comporta il coordinamento delle strategie di movimento per stabilizzare il centro di massa, durante perturbazioni dell'equilibrio, sia auto-iniziate che innescate dall'esterno. Si possono individuare sei importanti risorse per il controllo dell'equilibrio: vincoli biomeccanici; strategie di movimento; strategie sensoriali; orientamento nello spazio; controllo in dinamica; elaborazione cognitiva (Horak 2006).

Vincoli biomeccanici: il vincolo biomeccanico più importante quando si parla di equilibrio è la dimensione e la qualità della base d'appoggio, i piedi. Un tempo si credeva che l'equilibrio stabile in posizione verticale richiedesse, semplicemente, che la proiezione del centro di massa del corpo (CoM) fosse mantenuta all'interno dell'area della sua base di supporto delimitata dai piedi. Tuttavia, (Pai and Patton 1997) hanno esteso questo concetto proponendo che il mantenimento dell'equilibrio dipende sia dalla posizione proiettata del CoM che dalla sua velocità di spostamento rispetto ai confini

della base di supporto, derivando così un limite di posizione-velocità del CoM all'interno del quale l'equilibrio può essere mantenuto.

Strategie di movimento: esistono tre diverse strategie di movimento, che il corpo attua per mantenere la posizione di equilibrio. La strategia di caviglia, si applica in piccole perturbazioni e prevede che il corpo agisca come un pendolo rovesciato con fulcro sulla caviglia, compiendo piccole oscillazioni attorno ad essa. La strategia d'anca prevede la flessione-estensione dell'anca per traslare il centro di massa più anteriormente o più posteriormente, rispondendo così a perturbazioni di maggiore intensità. Infine, la strategia del passo si innesca in risposta a perturbazioni più violente, che obbligano la persona a compiere un passo avanti o indietro, per mantenere il centro di gravità all'interno della base d'appoggio. In questo studio le strategie utilizzate dai soggetti erano la strategia di caviglia e quella di anca.

Strategie sensoriali: come già detto, il sistema nervoso centrale deve elaborare le informazioni provenienti dal sistema visivo, dal sistema vestibolare e da quello somatosensoriale. Sono stati condotti studi, secondo i quali i segnali provenienti da questi sistemi sono integrati secondo la Teoria delle Decisioni Bayesiana. L'approccio della statistica bayesiana è caratterizzato dall'assegnazione di probabilità a qualsiasi grado di credenza sul mondo che ci circonda, questo fornisce un modo sistematico di risolvere i problemi in presenza di incertezza. Nella fattispecie, la percezione del mondo che ci circonda e il controllo motorio vengono posti all'interno di un quadro statistico, in cui, i segnali sensoriali sono combinati come somma ponderata in base alle loro incertezze relative e ai segnali con maggior incertezza viene assegnato meno peso rispetto a quelli con incertezza minore (Konrad P. Körding a 2006). Ad esempio, se ci troviamo su una superficie instabile, il nostro cervello, sarà portato ad attribuire un maggior grado di incertezza agli input somatosensoriali e si affiderà, invece, maggiormente, alle informazioni che derivano dai sistemi visivo e vestibolare (Horak 2006).

Orientamento nello spazio: è la capacità di orientare le parti del corpo rispetto alla gravità o rispetto la superficie d'appoggio. Ad esempio i soggetti del presente studio orientavano il proprio corpo perpendicolarmente alla tavoletta, fintanto che questa non iniziava ad inclinarsi, quindi orientavano il corpo secondo la gravità.

Controllo della dinamica: quando si cammina o quando si passa da una postura ad un'altra, il centro di massa non è all'interno della base d'appoggio, questo rende il controllo dell'equilibrio molto più complesso.

Elaborazione cognitiva: Molte risorse cognitive sono richieste per mantenere l'equilibrio. Più difficile è il compito posturale, maggiore è il compito cognitivo richiesto e maggiori sono i tempi di reazione. Quindi, più aumenta l'elaborazione a livello corticale, più la prestazione di equilibrio peggiora.

Recenti studi hanno fornito un forte supporto all'ipotesi che il SNC apprenda e mantenga modelli interni di trasformazioni sensomotorie. Un modello interno è un sistema neurale che prevede il comportamento del sistema sensomotorio e degli oggetti nell'ambiente esterno. I modelli interni consentono al SNC di prevedere le conseguenze di comandi motori e di determinare i comandi motori necessari per eseguire compiti specifici (Mitsuo Kawato 2007). Il paradigma del modello interno, dunque, postula che il movimento e l'equilibrio sono controllati da strutture neurali altamente adattabili (Joseph E. Barton, Anindo Roy, John D. Sorkin 2016). Le risposte a disturbi inaspettati sono innescate da informazioni sensoriali che indicano che lo stato del corpo si sta spostando verso una condizione di squilibrio. La risposta iniziale è generata dai processi del tronco encefalico e del midollo spinale di livello inferiore e successivamente modulata dai processi sopra-tronco cerebrale di livello superiore. I processi di livello inferiore sono costituiti da sinergie muscolari pre-programmate, attivate e modulate direttamente da segnali sensoriali. (Joseph E. Barton, Anindo Roy, John D. Sorkin 2016).

1.1.2 Stabilogram diffusion Analysis e SampleEntropy

Da quanto detto finora, appare chiaro, che il controllo dell'equilibrio risulta essere un compito complesso, che comporta l'azione dei muscoli distribuiti su tutto il corpo (Yury Ivanenko; Victor S. Gurfinkel 2018) e coinvolge complessi processi neurali. Il modo migliore per oggettivare il controllo posturale di un individuo risulta essere l'analisi del centro di pressione (CoP). La letteratura mostra che l'analisi del CoP è il riferimento primario per lo studio della postura e la coordinazione del movimento (Patti et al. 2018). Tramite l'utilizzo di una pedana di forza si possono estrapolare informazioni relative all'ampiezza delle oscillazioni antero-posteriori e medio-laterali del CoP e alla sua velocità.

Un ulteriore passo in avanti nello studio del controllo posturale umano è stato fatto da Collins e colleghi, con l'introduzione della stabilogram diffusion analysis (SDA) (J.J. Collins 1993)(Collins et al. 1995). L'SDA ha permesso di studiare i meccanismi di controllo posturale, ipotizzando che il mantenimento della postura possa essere visto come un processo stocastico, rappresentando quindi un indicatore affidabile della qualità del controllo posturale. In particolare dall'analisi dell'SDA è possibile estrapolare i coefficienti di diffusione, i quali riflettono il livello di attività stocastica del CoP considerando l'asse medio-laterale (Dx), antero-posteriore (Dy) o l'intero piano d'appoggio (Dr^2). L'estrazione di questi parametri della traiettoria del centro di pressione può essere direttamente legata al comportamento stazionario e all'interazione funzionale dei meccanismi neuromuscolari sottostanti il mantenimento della postura eretta (Collins et al. 1995). Un valore più elevato di questi coefficienti si traduce in un sistema di controllo meno strettamente regolato e quindi più caotico (Rizzato et al. 2018). Non solo, l'analisi degli stabilogramma ha permesso di individuare due distinti meccanismi di controllo neuromuscolare: uno basato su schemi di controllo a circuito aperto, impiegati per intervalli brevi e uno basato su meccanismi di controllo a circuito chiuso, impiegati per intervalli temporali maggiori. Il sistema a circuito aperto è caratterizzato dall'assenza di feedback e dall'invio di risposte automatiche ai muscoli posturali. Nel meccanismo a circuito chiuso, invece, vi è un invio costante di feedback, sulla posizione del corpo e delle sue parti, al SNC. Queste informazioni vengono elaborate a livello corticale e successivamente viene restituita una risposta neuromuscolare. Questa strategia di controllo a circuito aperto/chiuso, potrebbe essersi evoluta per tenere conto dell'intrinseco ritardo temporale dei cicli di feedback e per semplificare il compito di integrare grandi quantità di informazioni sensoriali quando il sistema non è a rischio di instabilità. Da quanto detto finora, si può capire perché diversi studi hanno considerato l'SDA un metodo affidabile per esplorare in modo rigoroso il controllo dell'equilibrio posturale.

Un'ulteriore analisi, condotta anche nel presente lavoro di tesi, per approfondire la comprensione dei meccanismi di controllo posturale è data dallo studio della regolarità della traiettoria del centro di pressione. La regolarità del CoP può essere quantificata calcolandone la sua entropia (SampleEntropy) (Roerdink, Hlavackova, and Vuillerme 2011). Maggiore è il valore di SampEn, più irregolare è la traccia del CoP. Questa irregolarità è stata correlata negativamente alla quantità di attenzione investita nel

controllo posturale (Donker et al. 2007). Dunque, maggiore è l'entropia della traiettoria del CoP, minore è l'attenzione impiegata dal soggetto e di conseguenza maggiore è l'automatismo del compito.

1.2 OBIETTIVO DELLO STUDIO

Partendo da quanto detto finora, il presente lavoro di tesi si prefiggeva l'obiettivo di andare studiare i miglioramenti, che un allenamento con l'utilizzo di tavolette basculanti, apportava all'equilibrio e le modificazioni indotte nei meccanismi di controllo posturale. Al fine di indagare ciò, è stato strutturato un protocollo di allenamento della durata di quattro settimane, che prevedeva tre sedute di allenamento a settimana, in cui ai soggetti era chiesto di mantenere l'equilibrio sopra una tavoletta basculante. All'inizio e alla fine del protocollo sono stati svolti test di valutazione. Al termine delle quattro settimane, ci si aspettava un miglioramento nella capacità di mantenere l'equilibrio sopra la tavoletta, un maggior automatismo del compito, con conseguente aumento dell'entropia, ed infine una riduzione dei coefficienti di diffusione, ad indicare una gestione dell'equilibrio meno caotica. Un altro degli obiettivi dello studio era quello di studiare il transfer nell'apprendimento motorio, andando a vedere se i miglioramenti ottenuti si riflettessero anche nell'esecuzione di compiti simili, quindi con l'utilizzo di una tavoletta di maggiore difficoltà, e su compiti specifici, con perturbazioni dello stato di equilibrio, dovute al movimento improvviso della base d'appoggio.

CAPITOLO 2.

MATERIALI E METODI

2.1 I PARTECIPANTI

Hanno partecipato volontariamente a questo studio 8 soggetti di età compresa tra i 18 e i 35 anni, di cui 3 femmine e 5 maschi (media \pm SD: 25,1 \pm 3,6 anni; 1,75 \pm 0,09 metri; 69,3 \pm 10,7 kg). Prima di iniziare lo studio tutti i soggetti hanno firmato il modulo per il trattamento dei dati personali e il consenso informato. I soggetti sono stati reclutati attraverso reti di conoscenza e passaparola. Per l'eleggibilità allo studio era sufficiente soddisfare i seguenti criteri di inclusione:

- Età compresa tra i 18 e i 35 anni;
- Assenza di infortuni muscoloscheletrici negli ultimi 6 mesi;
- Assenza di alterazioni a carico del sistema visivo o vestibolare;

2.2 STRUMENTAZIONE

Di seguito verranno descritti gli strumenti utilizzati in questo studio. Sia per quanto riguarda i test di valutazione, che per quanto riguarda le sedute di allenamento:

- Pedana dinamometrica AMTI BP6040 (fig.2.1). Si compone di sensori in grado di misurare le forze di reazione al suolo, generate dall'interazione tra pedana e soggetto; queste informazioni vengono poi utilizzate per ricavare il centro di pressione (CoP). Per la rilevazione, ci siamo serviti del software Balance Clinic (fig.2.2), che ci ha permesso di impostare la durata delle prove effettuate e di visualizzare, istante per istante, la traiettoria del centro di pressione.

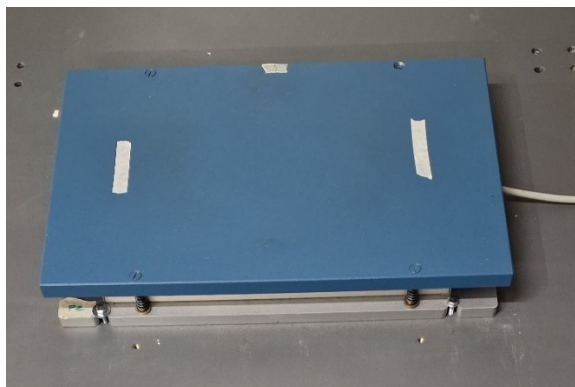


Figura 2.1. Pedana dinamometrica

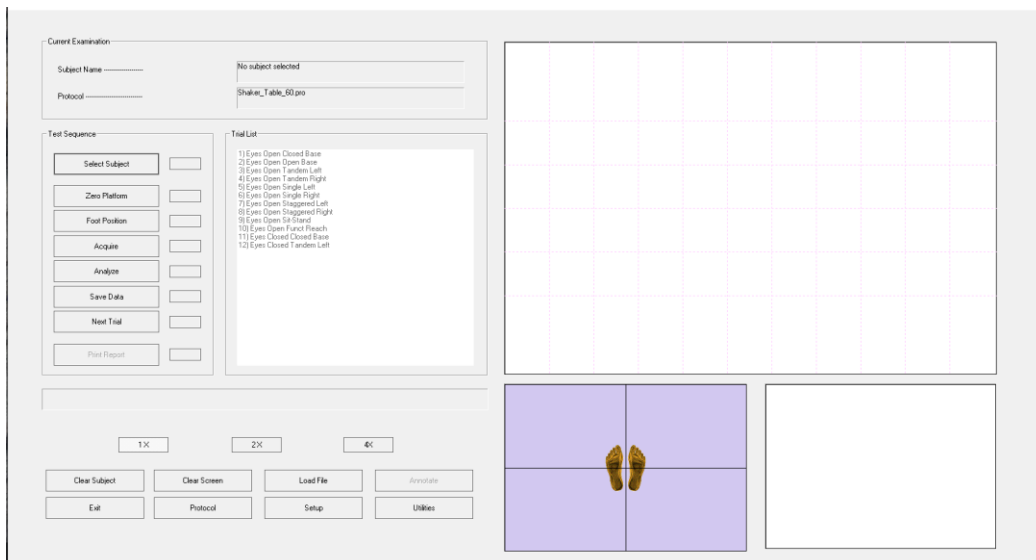


Figura 2.2. Software Balance Clinic

- Tavolette basculanti (fig.2.3, 2.4). Sono state utilizzate due diverse tavolette basculanti, per condurre test di equilibrio dinamico. Queste due tavolette differivano per l'ampiezza del diametro della base su cui poggiavano (20 cm la tavoletta easy e 15 cm la difficult), in questo modo la tavoletta con diametro minore risultava più instabile dell'omologa di diametro maggiore. L'oscillazione delle tavolette avveniva sempre in senso antero-posteriore, rispetto alla posizione del soggetto.



Figura 2.3. Basi d'appoggio tavolette basculanti



Figura 2.4. Tavolette basculanti

- Sensore inerziale XSens (fig.2.5). Si tratta di un piccolo apparecchio, che utilizza un accelerometro e un giroscopio, per rilevare le oscillazioni angolari che esso compie lungo gli assi x, y, z. Veniva posizionato sul margine anteriore delle tavolette (fig.2.6) e utilizzando il software MT-manager (fig. 2.7) e una frequenza di acquisizione di 100Hz, potevamo tenere traccia delle inclinazioni, antero-posteriori, che il soggetto faceva compiere alla tavoletta durante le prove.



Figura 2.5. Sensore inerziale

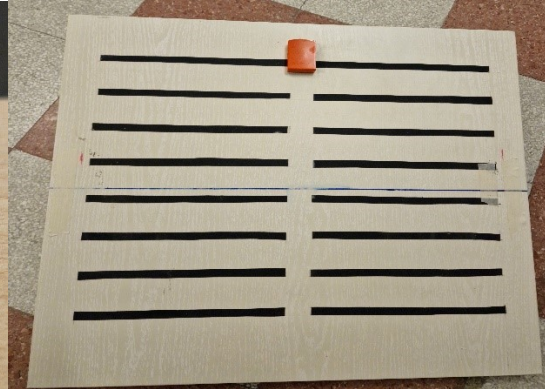


Figura 2.6. Sensore inerziale posizionato sulla tavoletta



Figura 2.7. Software Mt manager

- Shaker Table (fig. 2.8). È una pedana in grado di spostarsi in senso antero-posteriore, a velocità e spostamenti predeterminati. La pedana è mossa da un attuatore elettrico, controllato, a sua volta, dal software Real Time Test Controller RTC-9000 (fig. 2.9). Questo software permette di programmare la velocità di spostamento della pedana (espressa in mm/sec) e lo spazio che la pedana deve compiere (espresso in mm). Per queste prove è stato usato un protocollo *rampset* con velocità 200 mm/s e spostamento 50 mm e frequenza di acquisizione di 1000 Hz. Sulla superficie di questa pedana, infine, era posizionata la pedana dinamometrica che ci ha permesso di calcolare il centro di pressione (CoP) durante tutte le prove. Metro, dima triangolare e nastro carta, ci hanno permesso di standardizzare la posizione dei piedi di ciascun soggetto, sopra la pedana di

forza. Durante tutte le prove di equilibrio dinamico, ai soggetti è stata fatta indossare un'imbragatura di sicurezza, al fine di prevenire possibili cadute.



Figura 2.8. Shaker Table



Figura 2.9. Software Real Time Test Controller RTC-9000

2.3 PROTOCOLLO SPERIMENTALE

La durata del progetto è stata di circa 6 mesi, il reclutamento è iniziato nel mese di giugno e la fase sperimentale in quello di luglio. La fase sperimentale, che comprendeva il test di valutazione iniziale e il retest finale, è stata della durata di 6 settimane, per ciascun soggetto.

Il primo giorno i soggetti si sono presentati presso il laboratorio di nutrizione e dell'esercizio fisico del Dipartimento di scienze biomediche. Qui è stato spiegato loro, in maniera approfondita, il rationale dello studio, gli obiettivi che esso si poneva e, soprattutto, come si sarebbero svolti i test di valutazione e le sedute di allenamento. Dopodiché è stato sottoposto loro il modulo per il trattamento dei dati personali e il consenso informato. Una volta firmati, è stato possibile iniziare con la batteria di test di valutazione.

2.3.1 Test di valutazione iniziali

Con queste premesse sono state condotte diverse prove di equilibrio statico e dinamico, di seguito elencate in ordine:

- 10 prove di equilibrio statico. Il soggetto è stato posizionato, in posizione eretta, sopra la pedana dinamometrica (fig. 2.10). Le braccia dovevano essere tenute lungo i fianchi. Con l'ausilio di una dima è stata standardizzata la posizione dei piedi, che hanno assunto, così, un angolo di 30° l'uno rispetto all'altro. Al soggetto era chiesto di fissare, all'altezza degli occhi, un filo guida verticale, durante tutta la prova. Ciascuna prova durava 30 secondi, durante i quali, la pedana dinamometrica misurava le ground reaction forces (GFRs). A partire da questi dati il software era in grado, poi, di restituire l'immagine, in tempo reale, della traiettoria del CoP del soggetto.
- 10 prove di equilibrio dinamico, con tavoletta easy (diametro 20 cm): prima di iniziare il test a ciascun soggetto è stata calcolata la distanza tra la base della falange del primo dito del piede e il malleolo interno; dopodiché con una penna abbiamo segnato il punto medio di questa distanza. Abbiamo applicato il sensore inerziale sul margine anteriore della tavoletta e l'abbiamo, poi, posta sopra la pedana dinamometrica. I soggetti venivano prima imbragati e poi fatti salire sulla tavoletta, facendo attenzione a posizionare il segno fatto al centro del piede, in corrispondenza della linea che divideva a metà la superficie della tavoletta. Durante il test, il soggetto era libero di scegliere l'ampiezza dell'appoggio dei piedi che preferiva. Tale ampiezza veniva poi misurata e resa fissa per tutte e dieci le prove del test e del re-test. Questi accorgimenti ci hanno permesso di standardizzare la posizione dei piedi di ciascun soggetto e di renderla riproducibile in tutti i test. Oltre a questo, i partecipanti erano liberi di tenere la posizione delle braccia che ritenevano più consona e di volgere lo sguardo dove preferivano. Al via, il soggetto doveva cercare di mantenere la tavoletta il più ferma e parallela al terreno possibile. Ciascuna prova aveva una durata di 30 secondi, seguiti da 30 secondi di riposo. Durante questi 30 secondi, la pedana dinamometrica calcolava gli spostamenti del centro di pressione del soggetto, mentre il sensore inerziale misurava le oscillazioni angolari in direzione antero-posteriore, della tavoletta.



Figura 2.10. Prova di equilibrio statico (a sinistra); prova di equilibrio dinamico su tavoletta (a destra)

- 5 prove di equilibrio dinamico, con tavoletta difficult (diametro 15 cm): anche qui veniva individuato il punto medio del piede e posizionato, poi, sulla linea mediale della tavoletta. Il soggetto veniva imbragato e gli veniva chiesto di eseguire lo stesso compito svolto per le 10 prove precedenti. Gli accorgimenti erano sempre gli stessi e la durata di ciascuna prova era la medesima (30s + 30s di riposo). A differenza del test precedente, qui veniva utilizzato solamente il sensore inerziale, per rilevare le oscillazioni angolari della tavoletta.
- 5 prove di equilibrio dinamico, con perturbazione alla Shaker Table: il soggetto si posizionava, in stazione eretta, sopra la pedana dinamometrica, fissata a sua volta sopra la Shaker Table. Per motivi di sicurezza, venivano imbragati. Ogni persona poteva scegliere, in maniera arbitraria, la distanza tra i due piedi. Tale distanza veniva poi registrata e riprodotta durante tutti i test. Il soggetto doveva tenere le mani lungo i fianchi e fissare il filo guida verticale, all'altezza degli occhi. I partecipanti erano stati istruiti che la pedana si sarebbe potuta muovere e, nel caso, dovevano cercare di mantenere la posizione di equilibrio sia durante la perturbazione che al termine della stessa fino alla fine della prova. Ciascuna prova durava 30 secondi. Durante questi 30 secondi lo sperimentatore decideva, in modo casuale, se far muovere la Shaker Table (la perturbazione era presente in 3 delle 5 prove). Lo spostamento che la Shaker Table compiva era di 50 millimetri, in direzione antero-posteriore; mentre la velocità con la quale si muoveva era di 200 mm/sec.

È opportuno precisare, che i test venivano svolti dai soggetti a piedi scalzi.

2.3.3 Protocollo di allenamento

Una volta completata la valutazione iniziale, il soggetto doveva prendere parte ad un protocollo di allenamento, finalizzato al miglioramento dell'equilibrio e del controllo posturale. Nella fattispecie le sedute di allenamento sono state svolte per un periodo di quattro settimane e con una frequenza di tre volte a settimana. Ciascuna seduta era della durata di circa quindici minuti, veniva svolta scalzi e con il solo utilizzo della tavoletta basculante easy (fig. 2.11).



Figura 2.11. Esercizio su tavoletta

Di seguito verrà riportata una sintesi degli esercizi di allenamento proposti e delle variazioni che essi subivano nel corso delle settimane. Tali variazioni erano atte a creare un aumento della difficoltà degli esercizi, e quindi una progressione del carico che potesse enfatizzare al massimo il miglioramento dell'equilibrio e della capacità di controllo posturale.

1^a settimana

1. A piedi pari peso sui talloni e sulle punte, facendo toccare la tavoletta per terra (30''+30''rest) x3
2. Un piede avanti e uno dietro peso sui talloni e sulle punte, facendo toccare la tavoletta per terra. Alterno il piede avanti e quello dietro (30''+30''rest) x3

Le 3 serie degli esercizi 1 e 2 svolte rispettivamente con:

-Mani libere

-Mani ai fianchi

-Braccia aperte abdotte

3. Equilibrio classico (30''+30'' rest) x3

2^ settimana

1. A piedi pari peso sui talloni e sulle punte, non facendo toccare la tavoletta per terra (30''+30''rest) x3

2. Un piede avanti e uno dietro peso sui talloni e sulle punte, non facendo toccare la tavoletta per terra. Alterno il piede avanti e quello dietro (30''+30''rest) x3

Le 3 serie degli esercizi 1 e 2 svolte rispettivamente con:

-Mani libere

-Mani ai fianchi

-Braccia aperte abdotte

3. Equilibrio classico (30''+30'' rest) x3

3^ settimana

1. A piedi pari peso sui talloni e sulle punte, non facendo toccare la tavoletta per terra (30''+30''rest) x3

2. Equilibrio a piedi pari con stance larga (30''+30''rest) x3

3. Equilibrio in semi accosciata (30''+30''rest) x3

Le 3 serie degli esercizi 1, 2 e 3 svolte rispettivamente con:

- Mani libere
- Mani ai fianchi
- Braccia aperte abdotte

4. Equilibrio classico (30''+30'' rest) x3

4^ settimana

1. Equilibrio a piedi uniti (30''+30''rest) x4
2. Equilibrio in semi accosciata (30''+30''rest) x4

Le 4 serie degli esercizi 1 e 2 svolte rispettivamente con:

- Mani libere
- Mani ai fianchi
- Braccia aperte abdotte
- Braccia incrociate al petto

3. Equilibrio classico (30''+30'' rest) x4

le sedute di allenamento sono state svolte sia a domicilio, che presso il laboratorio del dipartimento, a seconda della disponibilità dei soggetti.

2.3.4 Test di valutazione finale

Al termine delle quattro settimane di allenamento, ai soggetti veniva somministrata nuovamente la stessa batteria di test iniziale, in modo da valutare eventuali progressi dovuti all'allenamento, in termini di controllo posturale e stabilità.

Riassumendo, ciascun soggetto ha eseguito:

- 10 prove di equilibrio statico.
- 10 prove di equilibrio dinamico su tavoletta basculante easy.
- 5 prove di equilibrio dinamico su tavoletta basculante difficult.
- 5 prove di equilibrio dinamico, con perturbazione alla Shaker Table.

CAPITOLO 3.

ANALISI DATI

Per l'elaborazione dei parametri, successivamente descritti, è stato utilizzato il Software Matlab (versione R2022b).

3.1 PRESTAZIONE DI EQUILIBRIO

Numerosi parametri sono stati presi in considerazione, per valutare la prestazione dell'equilibrio di ciascun soggetto e come l'allenamento con la tavoletta di media difficoltà avesse influenzato quest'ultima. Nei test con le due tavolette, di diversa difficoltà, ci siamo serviti di un sensore inerziale, per studiare le oscillazioni che i soggetti facevano compiere alle tavolette, cercando di rimanervi sopra in equilibrio.

I parametri che in questo caso siamo andati ad analizzare, sono stati: Full Balance (FB); Fine Balance (FiB); Gross Balance (GB).

Full balance: altro non è che un indicatore generale della prestazione di equilibrio del soggetto. Preso il grafico, raffigurante le oscillazioni della tavoletta (fig. 3.1), se ne ricava il valore assoluto e utilizzando il metodo degli integrali, si calcola l'area sotto la curva (fig. 3.2).

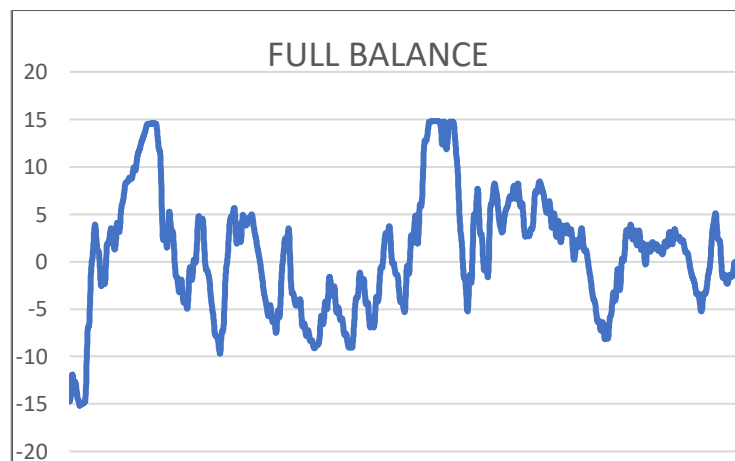


Figura 3.1. Grafico Full Balance

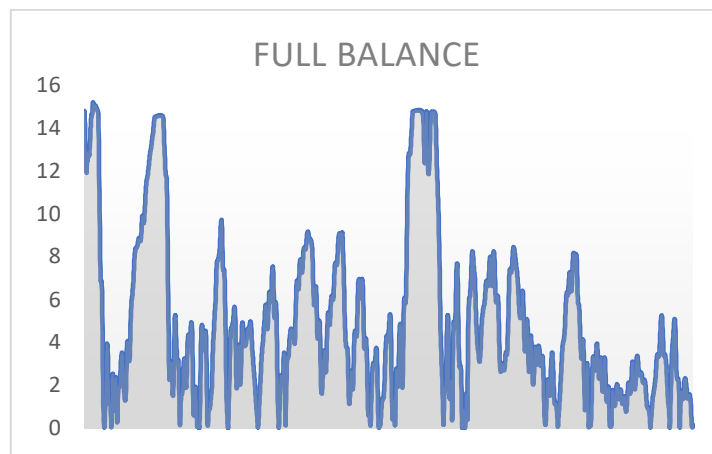


Figura 3.2. Grafico Full Balance in valori assoluti

Fine Balance: è un indice di controllo fine dell'equilibrio. Quantifica, in secondi, il tempo che il soggetto mantiene la tavoletta tra $+5^\circ$ e -5° di inclinazione.

Gross Balance: Quantifica, in secondi, il tempo che il soggetto mantiene la tavoletta tra $+10^\circ$ e -10° .

Per quanto riguarda i test di equilibrio dinamico con perturbazione, ovvero con l'utilizzo della Shaker Table, siamo andati ad indagare come cambiava la risposta dei soggetti alla perturbazione e per fare questo ci siamo avvalsi di numerosi parametri, quali: Area 95; Unith Path; First Peak; Max Oscillations; Post Perturbation Variability (PPV) di seguito descritti.

Area 95: rappresenta l'area dell'ellisse di confidenza, ovvero l'area che contiene il tracciato del COP (ottenuto grazie alla pedana dinamometrica) con un intervallo di confidenza del 95%. Minore è l'area, migliore è l'equilibrio.

Unith Path: è la velocità media con la quale si sposta il COP. Tanto più efficiente è l'equilibrio di un soggetto, quanto minore è Unith Path.

First Peak: ampiezza di spostamento del COP dopo la perturbazione. Viene calcolato sottraendo al valore minimo del COP antero-posteriormente (ovvero il primo picco dopo la perturbazione) il valore medio dello stesso COP calcolato nell'intervallo di tempo prima della perturbazione. Questo valore si può intendere come rappresentativo dei

meccanismi di azione riflessa, che il soggetto mette in campo per limitare lo spostamento del baricentro conseguente al movimento improvviso della pedana.

Max Oscillations: prende in considerazione il primo e il secondo picco, antero-posteriormente, successivi alla perturbazione. Rappresenta, quindi, l'escursione che il COP del soggetto compie, nella prima fase di reazione, immediatamente consecutiva alla perturbazione esterna.

Post Perturbation Variability: rappresenta la deviazione standard della componente anteroposteriore del COP nei 2,5 secondi successivi alla perturbazione. Più alto è il valore di PPV, maggiore è l'oscillazione che il COP compie nei 2,5 secondi dopo la perturbazione e pertanto, il recupero di uno stato di quiete a seguito della perturbazione.

I parametri sopra descritti sono illustrati nella figura 3.3 sottostante.

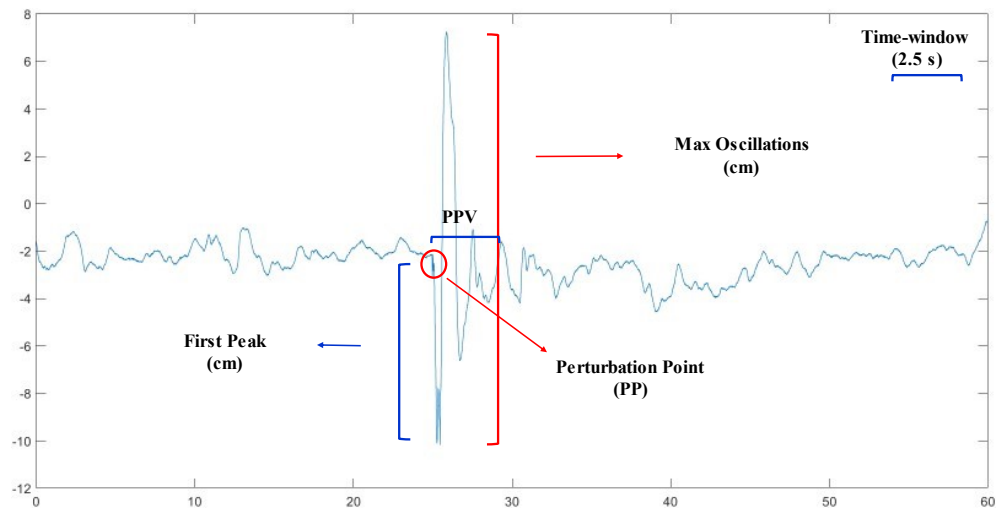


Figura 3.3. Rappresentazione grafica dei parametri First Peak, Max Oscillations e PPV

3.2 CONTROLLO MOTORIO

Per andare a valutare il controllo motorio di ciascun soggetto e la sua modificazione, in seguito alle quattro settimane di allenamento, ci siamo serviti dello studio della Stabilogram Diffusion Analysis (SDA). Quest'ultima risulta, infatti, essere un indice indiretto della qualità del controllo posturale.

L'SDA è stata calcolata in accordo con l'equazione formulata da Collins e colleghi (J.J. Collins 1993), ovvero:

$$\langle \Delta r^2 \rangle_{\Delta t} = \frac{\sum_{i=l}^{N-m} (\Delta r_i)^2}{(N - m)}$$

Questa equazione calcola lo spostamento quadratico medio $\langle \Delta r^2 \rangle$ in funzione dell'intervallo di tempo Δt (che copre m intervalli di dati) per una traiettoria COP di N punti dati. Il medesimo procedimento è stato impiegato per $\langle \Delta y^2 \rangle$ e per $\langle \Delta x^2 \rangle$. Grazie a questa equazione si ottiene il grafico di figura 3.4. Come si può notare, questo grafico è formato da due rette, aventi due diverse pendenze, le quali a loro volta individuano due distinte regioni del grafico. La prima regione è caratterizzata da una retta a pendenza maggiore e da un intervallo di tempo breve, essa rappresenta la regione a breve termine, dominata da meccanismi neuromuscolari a circuito aperto. La seconda regione, invece, presenta una retta con pendenza minore e si protrae per intervalli di tempo più lunghi, quest'area del grafico rappresenta la regione a lungo termine, dominata da meccanismi neuromuscolari a circuito chiuso. Il punto di intersezione, tra le due rette, viene denominato Critical Point e rappresenta il punto di transizione tra meccanismi a circuito aperto e meccanismi a circuito chiuso.

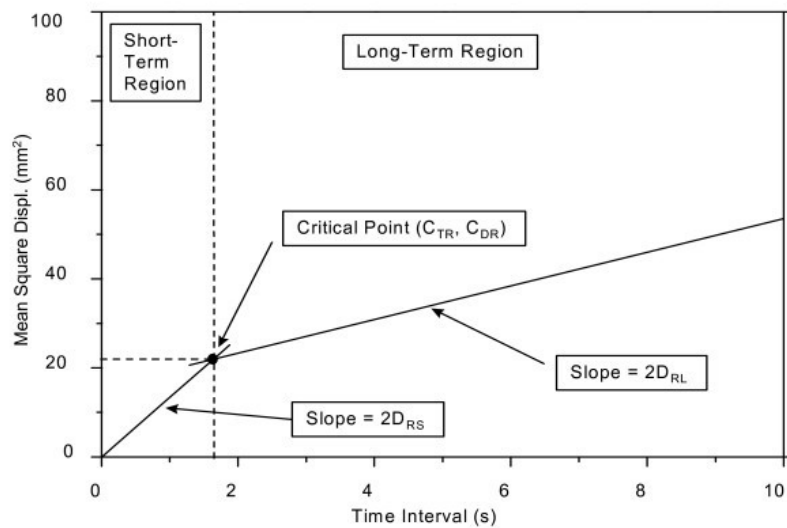


Figura 3.4. Rappresentazione schematica della SDA

Il calcolo dell'SDA ci restituisce i valori dei coefficienti di diffusione. Questi ultimi rappresentano il livello di attività stocastica del COP considerando l'asse medio-laterale (D_x), antero-posteriore (D_y) e il piano d'appoggio (D_r^2). Inoltre, come precedentemente accennato, l'analisi di diffusione dello stabilogramma ci permette di individuare due distinti meccanismi di controllo neuromuscolare: schemi motori a circuito aperto, utilizzati su intervalli di breve termine; schemi motori a circuito chiuso, impiegati in intervalli di lungo termine. Ne risulta, che avremo coefficienti di diffusione per i meccanismi su breve termine (short) e coefficienti di diffusione per i meccanismi su lungo termine (long).

Pertanto, i coefficienti di diffusione che abbiamo ottenuto dall'SDA sono i seguenti:

Ds_r^2 : indice globale di instabilità posturale nel breve periodo. Dato dalla combinazione di Ds_x^2 e Ds_y^2 .

Dl_r^2 : indice globale di instabilità posturale nel lungo periodo. Dato dalla combinazione di Dl_x^2 e Dl_y^2 .

Ds_x^2 : indice di instabilità posturale medio-laterale, su intervalli di breve termine.

Dl_x^2 : indice di instabilità posturale medio-laterale, su intervalli di lungo termine.

Ds_y^2 : indice di instabilità posturale antero-posteriore, su intervalli di breve termine.

Dl_y^2 : indice di instabilità posturale antero-posteriore, su intervalli di lungo termine.

Più bassi sono i coefficienti di diffusione e meno è casuale e caotica la gestione dell'equilibrio.

Infine, lo studio della Sample Entropy (SampEn) permette di andare ad analizzare se, grazie all'allenamento, ci sia stata una modificazione dei meccanismi neuromuscolari che sottendono al controllo motorio del gesto da noi analizzato, quindi un maggior automatismo nel mantenere la tavoletta il più possibile parallela al suolo.

I parametri ottenuti sono stati:

SampEn_X: regolarità delle oscillazioni di COP lungo l'asse medio-laterale.

SampEn_Y: regolarità delle oscillazioni di COP lungo l'asse antero-posteriore.

Più l'entropia aumenta, minor è l'attenzione posta al compito e quindi maggiore è l'automatismo.

3.3 ANALISI STATISTICA

Per quanto riguarda i parametri FB, FiB e GB, per le variabili dell'SDA e per i valori di Sample Entropy è stata condotta un'analisi della varianza per misure ripetute, utilizzando un test two-way ANOVA. Invece, per l'analisi delle variabili Area 95, Unith Path, First Peak, Max Oscillations e PPV, è stato un t-test per campioni appaiati. In questo caso, l'assunzione della distribuzione normale dei dati è stata verificata con il test di Shapiro-Wilk. Il livello di significatività utilizzato, per entrambi i test sopra citati, è stato posto a $p < 0.05$.

L'analisi statistica dei dati è stata eseguita con il Software JASP (versione 0.17.1.0).

CAPITOLO 4.

RISULTATI

4.1 PRESTAZIONI DI EQUILIBRIO SPECIFICO

4.1.1 Full balance

Dall'analisi statistica è emerso un effetto dell'allenamento statisticamente significativo ($p=0,009$) e un effetto della difficoltà della tavoletta, anch'esso significativo ($p<0.01$), sul parametro Full Balance. Non è invece risultata statisticamente significativa l'interazione tra le due variabili (Fig. 4.1). Ovvero, indipendentemente dalla tavoletta si hanno avuto prestazioni migliori dopo l'allenamento e le prestazioni con la tavoletta hard erano peggiori, indipendentemente dall'allenamento.

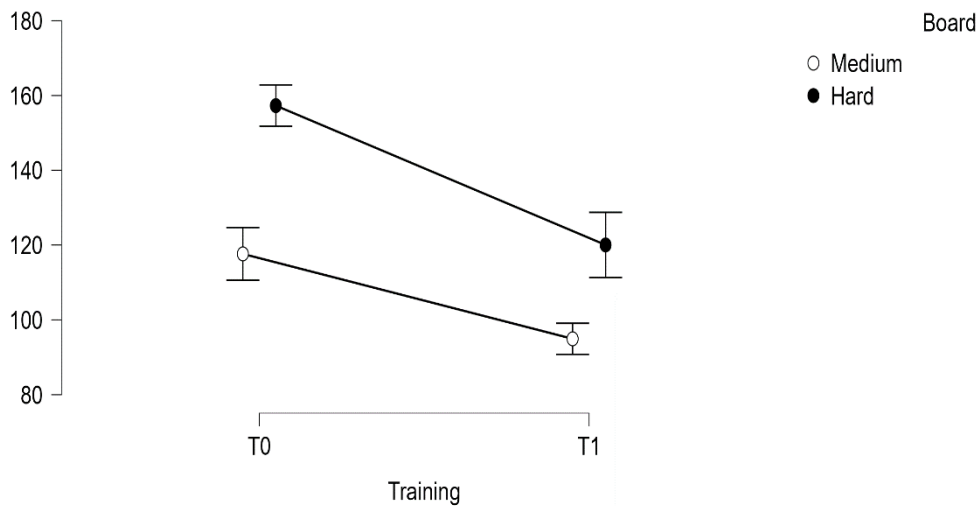


Figura 4.1. Analisi statistica Full balance.

4.1.2 Fine balance

Nell'analisi della variabile Fine Balance, il test statistico ha evidenziato un effetto altamente significativo della variabile allenamento ($p=0.001$) e della variabile tavoletta ($p=0.034$). Mentre non c'è stata un'interazione tra le due (Fig.4.2). Ovvero, anche in questo caso, indipendentemente dalla tavoletta si hanno avuto prestazioni migliori dopo

l'allenamento e prestazioni peggiori con la tavoletta hard, indipendentemente dall'allenamento.

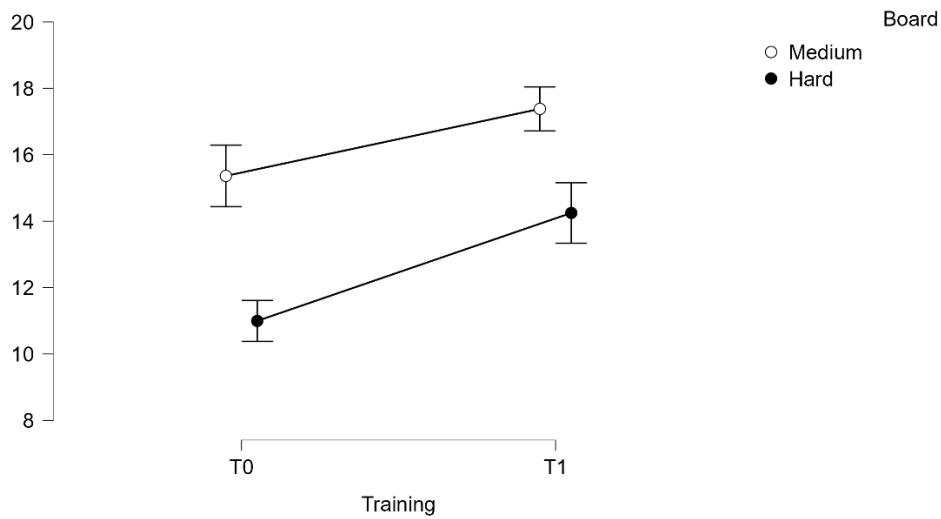


Figura 4.2. Analisi statistica Fine Balance

4.1.3 Gross Balance

Anche qui, l'analisi statistica ha messo in luce un effetto significativo della variabile allenamento ($p=0.009$) e della variabile tavoletta ($p=0.001$). Come per i precedenti parametri non vi è stata un'interazione statisticamente significativa tra due variabili (Fig.4.3).

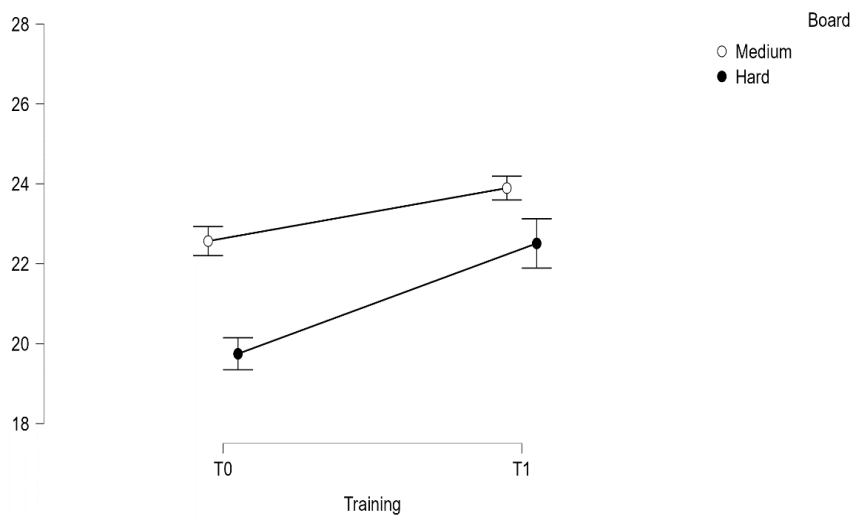


Figura 4.3. Analisi statistica Gross Balance

4.2 PRESTAZIONI DI EQUILIBRIO ASPECIFICO

4.2.1 Area 95 e Unith Path

Dall'analisi statistica non è emerso alcun effetto statisticamente significativo dell'allenamento sui valori di Area 95. Similmente, anche i risultati di Unith Path non hanno riscontrato un miglioramento statisticamente significativo (Fig.4.4).

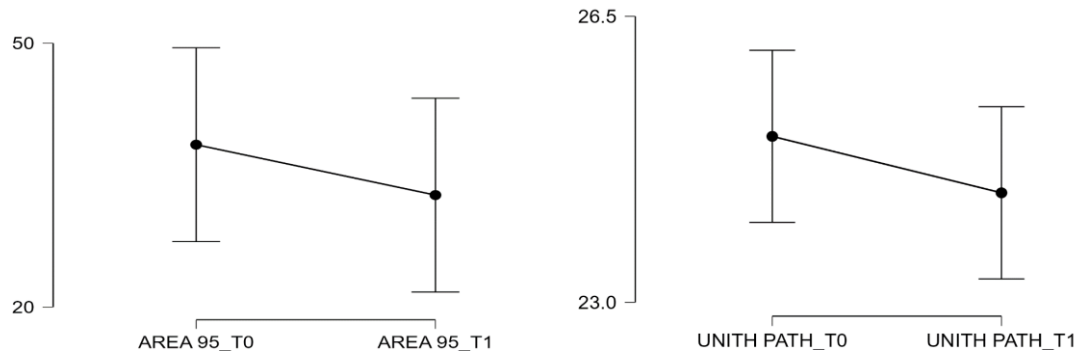


Figura 4.4. Analisi statistica Area 95 (a sinistra); analisi statistica Unith Path (a destra).

4.2.2 First Peak e Max Oscillations

L'analisi statistica condotta sul parametro First Peak non ha evidenziato effetti statisticamente significativi della variabile allenamento. Allo stesso modo, anche dal test statistico condotto sul parametro Max Oscillations è emerso che le quattro settimane di allenamento, sulla tavoletta basculante di media difficoltà, non hanno prodotto una modificazione del parametro statisticamente significativa (Fig.4.5).

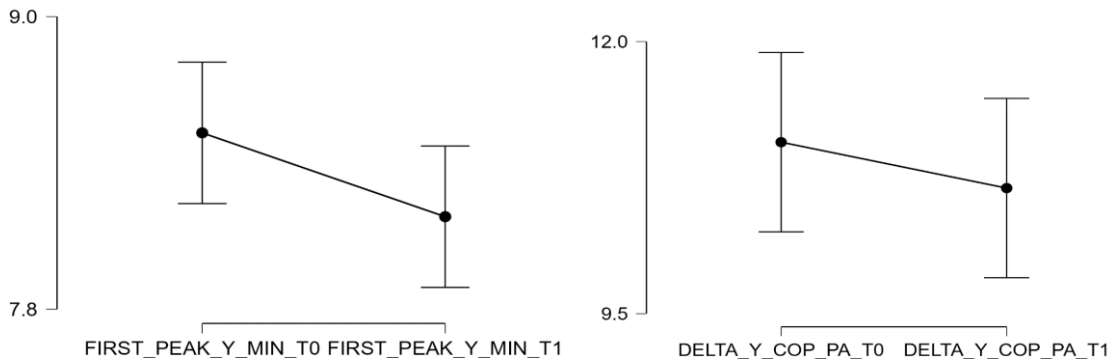


Figura 4.5. Analisi statistica First Peak Y (a sinistra); analisi statistica Max Oscillations (a destra)

4.2.3 Post Perturbation Variability

Dall'analisi statistica della Post Perturbation Variability non è emerso un effetto allenamento statisticamente significativo in seguito alle quattro settimane di allenamento (Fig.4.6).

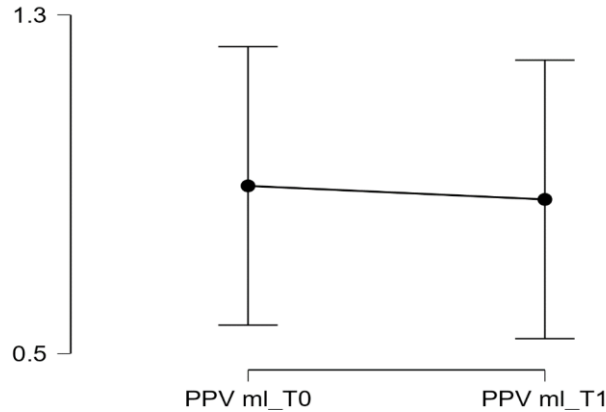


Figura 4.6. Analisi statistica PPV

4.3 CONTROLLO MOTORIO

4.3.1. Coefficienti di diffusione planare

Per quanto riguarda il coefficiente di diffusione planare a breve termine, l'analisi statistica ha evidenziato una differenza statisticamente significativa per quanto riguarda le due condizioni, statica e dinamica ($p=0.011$). Inoltre c'è stato un effetto statisticamente significativo della variabile allenamento ($p=0.05$). L'interazione tra i due non ha dato risultati significativi. Allo stesso modo, Dallo studio statistico del coefficiente di diffusione planare a lungo termine, per quanto concerne quindi risposte neuromuscolari a circuito chiuso, è emerso un effetto significativo della variabile condizione ($p=0.002$) e un altrettanto effetto significativo dell'allenamento ($p=0.016$). In questo caso, invece, l'interazione allenamento-condizione è risultata statisticamente significativa ($p=0.016$) (Fig.4.7).

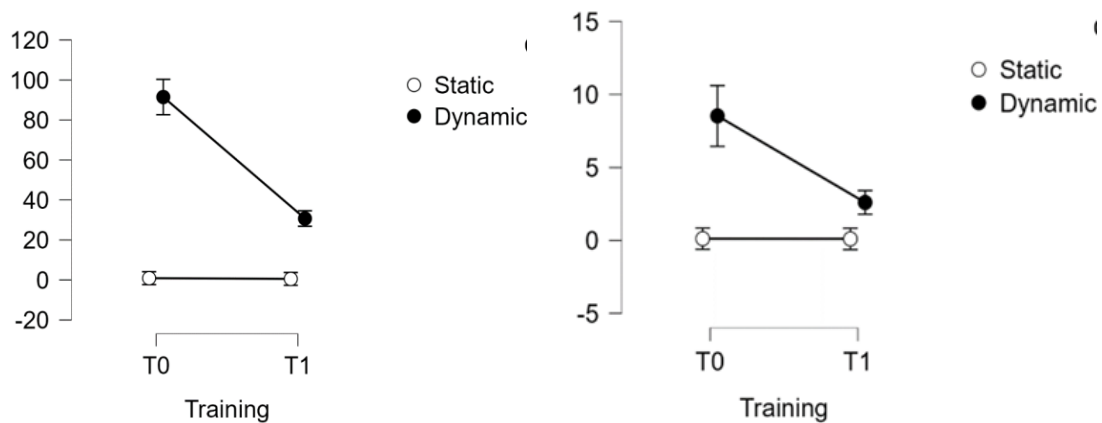


Figura 4.7. Analisi statistica Ds_r^2 (a sinistra); Analisi statistica DI_r^2 (a destra)

4.3.2 Coefficienti di diffusione antero-posteriore

Dall'analisi statistica del coefficiente di diffusione antero-posteriore, short, è emerso che sia l'effetto condizione ($p < 0.001$), sia l'effetto allenamento ($p < 0.001$) sono risultati significativi. Inoltre, è risultata significativa anche l'interazione condizione-allenamento ($p < 0.001$). Andando ad analizzare il coefficiente di diffusione antero-posteriore, sul lungo periodo, anche qui si può apprezzare un effetto statisticamente significativo della variabile condizione ($p = 0.003$), della variabile allenamento ($p = 0.044$). In aggiunta a questi, anche l'interazione tra le due variabili è risultata avere una significatività ($p = 0.045$) (Fig.4.8).

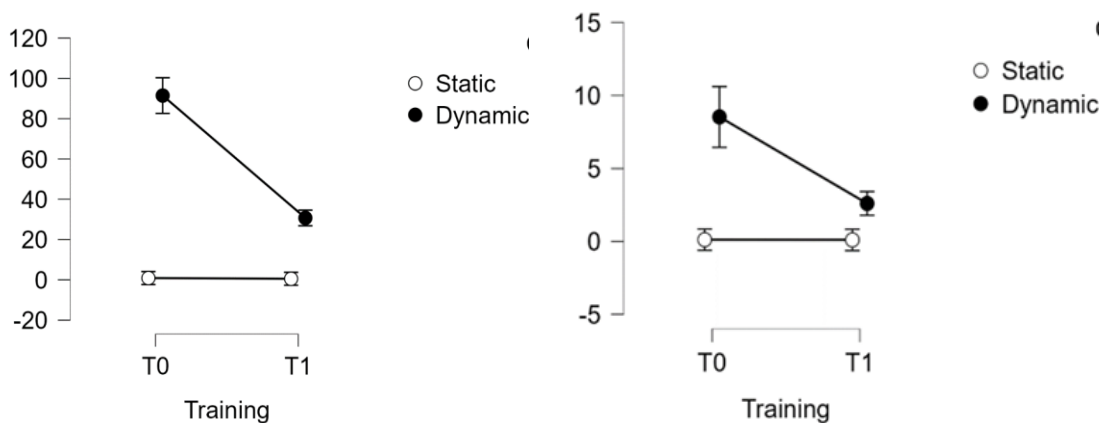


Figura 4.8. Analisi statistica $Ds_{antero-posteriore}$ (a sinistra); analisi statistica $DI_{antero-posteriore}$ (a destra)

4.3.3. Coefficienti di diffusione medio-laterale

Per quanto riguarda il coefficiente di diffusione medio-laterale, nel breve termine, lo studio statistico non ha messo in luce alcuna significatività, né per quanto riguarda la

variabile allenamento né per quanto concerne l'interazione condizione-allenamento. Solo la variabile condizione ha restituito un risultato statisticamente rilevante ($p=0.019$). Per quanto concerne, invece, il coefficiente di diffusione medio-laterale, long, Dall'analisi statistica delle tre variabili prese in esame, non è emersa alcuna significatività (Fig.4.9).

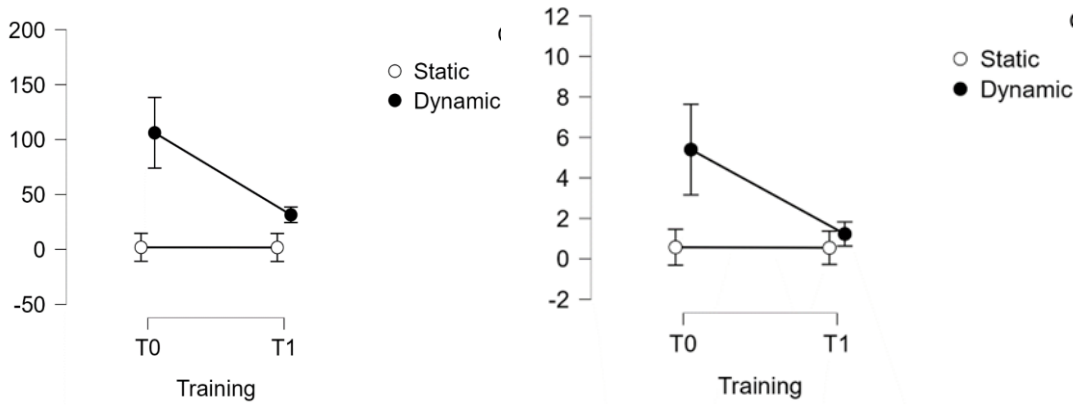


Figura 4.9. Analisi statistica $Ds_{medio-laterale}$ (a sinistra); analisi statistica $DI_{medio-laterale}$ (a destra)

4.3.4 Analisi dell'entropia

Lo studio dell'entropia lungo l'asse antero-posteriore ha evidenziato un effetto altamente significativo sia per la variabile condizione ($p<0.001$), sia per la variabile allenamento ($p<0.001$). Inoltre è risultata statisticamente significativa anche l'interazione condizione-allenamento ($p<0.001$). Prendendo in esame, invece, l'entropia lungo l'asse medio-laterale è emerso un effetto significativo della variabile condizione ($p<0.001$) e un effetto altrettanto significativo del fattore allenamento ($p<0.001$). Inoltre, anche qui, l'interazione condizione-allenamento si è dimostrata significativa ($p<0.001$) (Fig. 4.10).

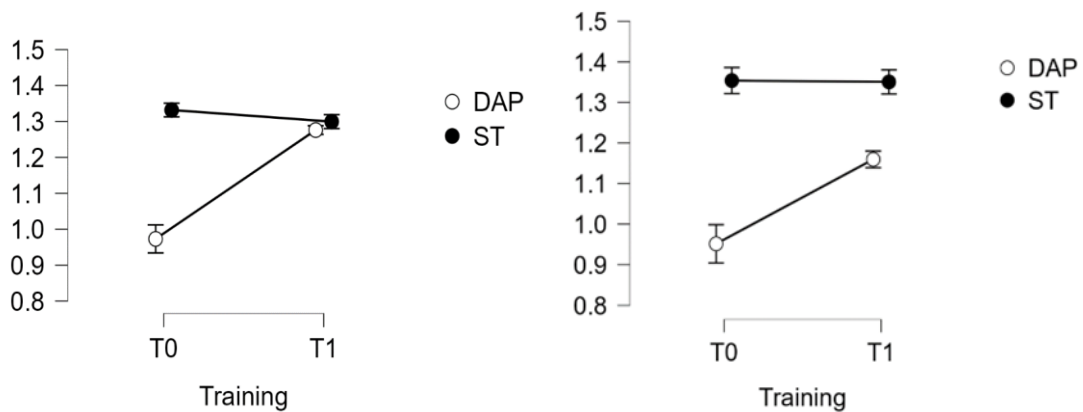


Figura 4.10. Analisi statistica $SampEn_{antero-posteriore}$ (a sinistra); analisi statistica $SampEn_{medio-laterale}$ (a destra)

CAPITOLO 5.

DISCUSSIONE E CONCLUSIONE

Il presente studio scientifico si proponeva come obiettivo quello di andare a valutare l'effetto che un allenamento di quattro settimane, su una tavoletta basculante, aveva sulla prestazione di equilibrio e sui meccanismi di controllo posturale, in soggetti giovani e in salute. Inoltre, voleva andare ad indagare il transfer che questi avesse in compiti specifici e aspecifici. Più precisamente, l'ipotesi era che quattro settimane di allenamento, svolto su una tavoletta basculante di media difficoltà, portasse ad un miglioramento di quella che era la prestazione di equilibrio e un miglioramento della qualità del controllo motorio, con una gestione dell'equilibrio meno caotica. Inoltre, siamo andati a verificare se questo allenamento apportasse delle modifiche ai circuiti neurali utilizzati per il controllo motorio. Nello specifico, ci aspettavamo un passaggio da circuiti neuromuscolari chiusi, quindi con continui feedback sensoriali ed elaborazioni a livello corticale, a circuiti aperti, quindi con una richiesta attentiva minore e maggior automatismo. La seconda ipotesi formulata per questo studio era se questi cambiamenti si trasferissero anche in altri compiti specifici e aspecifici. Quindi, se questi cambiamenti vi fossero anche in prove di equilibrio su una tavoletta basculante di maggiore difficoltà (transfer specifico) e sul mantenimento dell'equilibrio a seguito di una perturbazione esterna, dovuta al movimento di una pedana sulla quale i soggetti rimanevano in stazione eretta (compito aspecifico).

Stando ai dati riportati nel precedente capitolo, si può concludere che l'allenamento ha portato ad un miglioramento dell'equilibrio dei soggetti in entrambe le tavolette, e ad un controllo posturale meno caotico e randomico. Tuttavia, per quanto riguarda i parametri analizzati nello svolgimento del compito aspecifico, l'allenamento non ha prodotto un effetto statisticamente significativo sulla prestazione di equilibrio.

Andando a vedere nel dettaglio i dati raccolti dal sensore inerziale, dopo le quattro settimane di allenamento, possiamo notare come tutti e tre i parametri abbiano avuto un miglioramento statisticamente significativo. Infatti, vi è stata una riduzione del Full Balance, mentre si è avuto un notevole aumento dei valori di Fine Balance e Gross Balance, ad indicare che i soggetti riuscivano a mantenere per più tempo la tavoletta entro limiti di inclinazione, rispettivamente di ± 5 deg e ± 10 deg. Questo significa che

l'allenamento è risultato efficace nel migliorare quella che è la prestazione dell'equilibrio. Non solo, i miglioramenti dei parametri si sono registrati anche nelle prove con la tavoletta con la quale i soggetti non si erano allenati. Ciò sta ad indicare che c'è stato un transfer in un compito simile, ma non uguale, a quello svolto in allenamento.

Esaminando i risultati della stabilogram diffusion analysis, si può vedere che c'è stata una riduzione del coefficiente di diffusione planare e del coefficiente di diffusione antero-posteriore. Mentre il coefficiente di diffusione medio-laterale non ha subito miglioramenti statisticamente significativi. Quest'ultimo risultato è spiegabile con il fatto che sia gli allenamenti, che le prove, sono stati svolti su tavolette che oscillavano in senso antero-posteriore. Dunque, la richiesta di equilibrio medio-laterale risultava ridotta. Nel complesso, si può affermare che le quattro settimane di allenamento hanno portato ad un miglioramento nella gestione globale dell'equilibrio, più marcato in antero-posteriore.

Concentrandosi sui dati dell'entropia, appare chiaro come anche qui l'allenamento abbia sortito un cambiamento del controllo motorio. Infatti, al termine delle quattro settimane, l'entropia lungo l'asse antero-posteriore risulta aumentata, così come l'entropia lungo l'asse medio-laterale. Ciò sta a significare che il protocollo di allenamento ha portato ad un maggior automatismo nello svolgimento del compito. Questi risultati, così come quelli riscontrati nell'SDA, sono concordi con il miglioramento della prestazione registrato dal sensore inerziale. Dunque, una migliore qualità del controllo posturale e un maggiore automatismo dei meccanismi neuromuscolari hanno portato ad una miglior prestazione di equilibrio.

Per quanto riguarda l'indagine sul transfer in un compito aspecifico, anche se l'analisi delle prove svolte sulla Shaker Table ha evidenziato un miglioramento dei parametri (Area 95; Unith Path; First Peak; Max Oscillations; Post Perturbation Variability), tale effetto non è risultato essere statisticamente significativo. In definitiva, il protocollo di allenamento non si è dimostrato efficace nel migliorare l'equilibrio anche in compiti aspecifici. Tuttavia, i miglioramenti evidenziati potrebbero suggerire che modifiche nei parametri di intensità e durata dell'allenamento potrebbero portare a miglioramenti più marcati anche in un compito di equilibrio dinamico aspecifico. È utile ricordare, infatti, che gli allenamenti duravano circa quindici minuti e sono stati svolti per sole quattro settimane.

Per concludere, si può affermare che quattro settimane di allenamento svolto su tavoletta basculante ha portato ad un notevole miglioramento della prestazione di equilibrio, sia sulla tavoletta dove si allenavano i soggetti che su una tavoletta con un più alto grado di difficoltà. Questa miglior prestazione è riconducibile alla maggior efficienza dei meccanismi neuromuscolari che sottendono al controllo motorio e che rendono la gestione globale dell'equilibrio meno caotica e più automatica.

Infine, è interessante notare come tali cambiamenti si siano avuti a seguito di un periodo di allenamento tutto sommato breve, sia in termini di singole sedute che di durata complessiva del protocollo. Per il futuro appare quindi affascinante indagare come diversi protocolli di allenamento possano condurre a diverse modifiche nel controllo dell'equilibrio e a transfer in diversi compiti. La letteratura scientifica riguardante gli argomenti trattati in questo lavoro di tesi è molto scarsa e ulteriori studi sono pertanto auspicabili per approfondire questa tematica.

BIBLIOGRAFIA

- Collins, J. J., C. J. De Luca, A. Burrows, and L. A. Lipsitz. 1995. "Age-Related Changes in Open-Loop and Closed-Loop Postural Control Mechanisms." *Experimental Brain Research* 104(3): 480–92.
- Donker, Stella F., Melvyn Roerdink, An J. Greven, and Peter J. Beek. 2007. "Regularity of Center-of-Pressure Trajectories Depends on the Amount of Attention Invested in Postural Control." *Experimental Brain Research* 181(1): 1–11.
- Horak, Fay B. 2006. "Postural Orientation and Equilibrium: What Do We Need to Know about Neural Control of Balance to Prevent Falls?" *Age and Ageing* 35(SUPPL.2): 7–11.
- J.J. Collins, C.J. De Luca. 1993. "Open-Loop and Closed-Loop Control of Posture: A Random-Walk Analysis of Center-of-Pressure Trajectories." : 292.
- Joseph E. Barton, Anindo Roy, John D. Sorkin, Mark W. Rogers e Richard Macko. 2016. "An Engineering Model of Human Balance Control Part 1 : Biomechanical Model APPENDICES."
- Konrad P. Körding a, Daniel M. Wolpert. 2006. "Bayesian Decision Theory in Sensorimotor Control - ScienceDirect."
- Mitsuo Kawato, Daniel Wolpert. 2007. "Internal Models for Motor Control - Kawato - Novartis Foundation Symposia - Wiley Online Library."
- Pai, Yi Chung, and James Patton. 1997. "Center of Mass Velocity-Position Predictions for Balance Control." *Journal of Biomechanics* 30(4): 347–54.
- Patti, Antonino et al. 2018. "Postural Control and Balance in a Cohort of Healthy People Living in Europe An Observational Study." *Medicine (United States)* 97(52).
- R Johansson; M Magnusson. 1991. "Human Postural Dynamics."
- Rizzato, Alex et al. 2018. "Short-Term Modifications of Postural Balance Control in Young Healthy Subjects after Moderate Aquatic and Land Treadmill Running."

Roerdink, Melvyn, Petra Hlavackova, and Nicolas Vuillerme. 2011. "Center-of-Pressure Regularity as a Marker for Attentional Investment in Postural Control: A Comparison between Sitting and Standing Postures." *Human Movement Science* 30(2): 203–12.

Yury Ivanenko; Victor S. Gurfinkel. 2018. "Human Postural Control : Overview."

Ci tengo a ringraziare il professore Giuseppe Marcolin per avermi accompagnato nella stesura di questo lavoro di tesi. Per l'estrema professionalità ed allo stesso tempo umanità con la quale si è sempre reso disponibile ad aiutarmi e guidarmi. Ringrazio Alex per l'aiuto e il supporto datomi.

Ringrazio tutte le persone che hanno deciso di prendere parte allo studio, permettendomi così di realizzare questa tesi.

Ringrazio tutti i miei amici, che da anni, ormai, mi supportano e sopportano. Perché la loro sola esistenza è per me il dono che ogni giorno mi fa affrontare la vita con entusiasmo.

Infine, ringrazio tutta la mia famiglia ed in particolare i miei genitori per tutto quello che hanno fatto per me, fin da quando sono nato. Perché il loro infinito amore è per me il faro nella notte, la Stella Polare in mezzo al mare, che mi impedisce di perdermi e che riempie la mia vita di speranza e di gioia. E per questo non potrò mai ringraziarli abbastanza.