



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Scienze Biomediche

Corso di Laurea Triennale in Scienze Motorie

Tesi di Laurea

**STUDIO DELL'EFFETTO DI PERTURBAZIONI CONTINUE DELLA BASE
D'APPOGGIO SUI MECCANISMI DI CONTROLLO POSTURALE**

Relatore: Prof. Marcolin Giuseppe

Correlatore: Dott. Alex Rizzato

Laureando: Livieri Matteo

N° di matricola: 2058651

Anno Accademico 2023/2024

INDICE

ABSTRACT.....	3
1. INTRODUZIONE.....	5
1.1 Controllo posturale.....	5
<i>1.1.1 Equilibrio statico e dinamico.....</i>	<i>5</i>
<i>1.1.2 Fattori influenzanti il controllo posturale.....</i>	<i>6</i>
1.2 Strategie per il controllo dell'equilibrio.....	8
1.3 Apprendimento neurofisiologici.....	9
1.3.1 Il Controllo Anticipatorio.....	9
1.3.2 I Riflessi.....	9
1.4 Scopo dello studio.....	10
2. MATERIALI E METODI.....	11
2.1 Partecipanti.....	11
2.2 Strumentazione	11
2.2.1 <i>Shaker Table.....</i>	<i>11</i>
2.2.2 <i>Pedana Dinamometrica.....</i>	<i>12</i>
2.3 Protocollo sperimentale	12
2.3.1 <i>Prove statiche e dinamiche</i>	<i>12</i>
2.3.2 <i>Procedura sperimentale.....</i>	<i>14</i>
3. ANALISI DATI E RISULTATI.....	15
3.1 Analisi dati.....	15
3.1.1 <i>Analisi CoP.....</i>	<i>15</i>
3.2 Analisi statistica.....	17
3.3 Risultati	19
3.3.1 <i>Perturbazione continua.....</i>	<i>19</i>
3.3.2 <i>Perturbazione improvvisa.....</i>	<i>20</i>
4. CONCLUSIONE	23
5. BIBLIOGRAFIA.....	25

ABSTRACT

Introduzione: Una buona postura unita ad una buona capacità di controllo posturale permette al soggetto, entro certi limiti, di riuscire a stabilizzare il proprio corpo mantenendo uno stato d'equilibrio quando sottoposto a perturbazioni esterne. Una buona gestione dell'equilibrio ci permette di mantenere il controllo posturale, di rispondere rapidamente ed efficacemente a perturbazioni esterne improvvise e di adattarci rapidamente a cambiamenti situazionali inattesi.

Scopo dello studio: Il presente studio ha lo scopo di indagare l'effetto di perturbazioni esterne continue, nello specifico perturbazioni randomiche, indotte mediante la traslazione della base d'appoggio, sulla capacità del controllo posturale dinamico attraverso l'interpretazione di parametri correlati alla traiettoria del centro di pressione (CoP), misurati con una pedana dinamometrica.

Materiali e metodi: Sono stati reclutati 27 soggetti (M=13; F=14). È stata utilizzata una pedana mobile (Shaker Table) i cui spostamenti differivano per ampiezza e velocità, mentre sia distanza percorsa durante le prove (3000mm) che durata delle prove (80s totali) rimanevano invariate. Inoltre, è stata utilizzata una pedana di forza fissata al di sopra della pedana mobile per misurare la traiettoria del CoP durante le prove. Ciascun soggetto ha eseguito 18 prove di equilibrio suddivise rispettivamente in: cinque prove di equilibrio statico, tre prove per il calcolo dei limiti di stabilità e dieci prove di equilibrio dinamico. Quest'ultime venivano eseguite in due sessioni, le quali variavano solamente per la tipologia di prove di equilibrio dinamico: RANDOM (perturbazione continua di tipo randomico) e CONTROLLO (no perturbazione continua), mentre le prove di equilibrio statico e i limiti di stabilità venivano ripetuti con la medesima modalità esecutiva. Le due sessioni sperimentali erano svolte in giorni diversi e dovevano essere intervallate tra di esse da un periodo di almeno 48 ore e concluse nell'arco di due settimane. In tali prove, sono stati calcolati i seguenti parametri relativi al CoP: Unit Path (UP), Area dell'ellisse di confidenza (Area95), First Peak (FP) e Post Perturbation Variability (PPV).

Risultati: Si è notato che nel confronto della perturbazione continua tra T0 e T1, con T0 che corrisponde alla prima applicazione di una perturbazione continua randomica, mentre T1 corrisponde alla seconda applicazione della stessa tipologia di perturbazione attuata in T0, vi sia un effetto apprendimento indipendentemente dalla tipologia di stimolo ricevuto, con un miglioramento significativo ($p < 0.001$) di Area95 e UP.

Inoltre, si è osservato un miglioramento della capacità del soggetto di reagire ad una perturbazione improvvisa, ovvero una variazione rapida ed inaspettata delle condizioni della superficie d'appoggio, in tutti i parametri (Area95, UP, FP e PPV) quando la perturbazione improvvisa era preceduta da una perturbazione continua rispetto ai test di controllo privi di perturbazione.

Conclusioni: In conclusione si può affermare che uno stesso stimolo continuo ripetuto una seconda volta porti ad un miglioramento dei parametri UP e Area95. Una perturbazione continua, di tipo randomico, antecedente ad una perturbazione improvvisa porta ad un miglioramento di tutti i parametri (UP, Area95, FP e PPV, rispetto ad una condizione di controllo, indicando un miglioramento dell'equilibrio e del controllo posturale.

1 INTRODUZIONE

1.1 Controllo posturale

1.1.1 Equilibrio statico e dinamico

L'abilità di equilibrio, secondo Paillard (2017b), è definita come la capacità del soggetto di mantenere il centro di gravità (CoG), ovvero la proiezione a terra del centro di massa (CoM), all'interno della base d'appoggio per evitare cadute. Idealmente, il CoG dovrebbe essere allineato con il centro di pressione (CoP), che rappresenta la risultante delle forze di pressione esercitate dai piedi sul piano d'appoggio. La postura è definita come la posizione dei diversi segmenti corporei in relazione all'ambiente circostante (Paillard, 2017b), ovvero l'atteggiamento abituale di una persona dovuto alla contrazione di vari gruppi muscolari per contrastare la forza di gravità. Più nello specifico, il controllo posturale comprende due tipologie di equilibrio: statico e dinamico.

Il controllo posturale consiste nell'abilità di controllare i vari segmenti corporei coordinandosi tra loro, permettendo così al soggetto di diminuire il rischio di caduta durante l'esecuzione di un qualsiasi atto motorio (Takakusaki, K., 2017). Nello specifico, l'equilibrio statico è la capacità di un soggetto di controllare e minimizzare l'ampiezza delle oscillazioni del corpo umano in una condizione di quiete ed in assenza di perturbazioni (Paillard, 2017a; Wang et al., 2016), poiché dal punto di vista biomeccanico il corpo umano può essere modellizzato come un pendolo inverso considerando che il CoM non è allineato con l'asse della caviglia ed il CoP si trova anteriorizzato di circa 50-60 mm rispetto ad essa, la caviglia sarà dunque costretta a compiere un movimento equilibratore il quale andrà a generare una continua oscillazione antero-posteriore del corpo, unita ad un'oscillazione medio-laterale meno marcata. Idealmente, CoM e CoP dovrebbero essere allineati, ma ciò nella realtà non avviene quasi mai, a causa della conformazione del corpo umano. Tali condizioni vanno a determinare che per uno spostamento del CoM ne consegue uno del CoP per controbilanciare il movimento del CoM andando a limitare la sua uscita dalla base d'appoggio, evitando così la caduta.

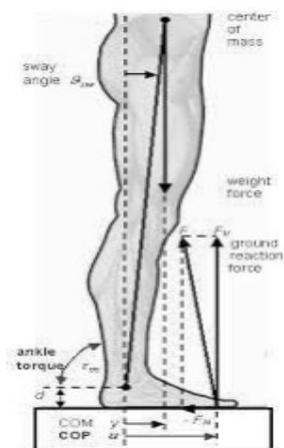


Figura 1.1: Modello biomeccanico del pendolo inverso.

L'equilibrio dinamico consiste nella capacità del soggetto di analizzare ed utilizzare informazioni propriocettive ed esteroceettive per mantenere la stabilità del corpo ed una postura adeguata in presenza di alterazioni della base d'appoggio o in presenza di perturbazioni improvvise provenienti dall'ambiente esterno (Wang et al., 2016).

1.1.2 Fattori determinanti il controllo posturale

Il controllo posturale viene determinato da molteplici fattori, primo fra tutti la capacità del soggetto di integrare le informazioni provenienti da tre sistemi sensoriali che collaborano tra di loro per permettere una migliore gestione dell'equilibrio: l'apparato vestibolare, il sistema visivo e il sistema propriocettivo. L'apparato vestibolare è l'insieme di organi presenti nell'orecchio interno che forniscono informazioni sulla posizione e il movimento della testa, fondamentali per il mantenimento dell'equilibrio. È composto da due componenti principali: i canali semicircolari e gli organi otolitici. I canali semicircolari, tre per ogni orecchio, sono disposti perpendicolarmente tra loro e misurano le accelerazioni e decelerazioni angolari della testa. Gli organi otolitici, invece, comprendono il sacco e l'utricolo, che rilevano la posizione della testa e le variazioni di velocità lineare. Il sacco contiene cellule ciliate orientate orizzontalmente, che rispondono alle inclinazioni della testa rispetto alla posizione orizzontale e alle accelerazioni e decelerazioni lineari verticali. L'utricolo, invece, presenta cellule ciliate orientate verticalmente, che rispondono alle accelerazioni e decelerazioni lineari orizzontali. Queste cellule ciliate sono circondate da una sostanza liquida che, muovendosi in risposta agli spostamenti della testa, permette di fornire informazioni precise sul movimento e sulla posizione della testa

Il sistema visivo funge da supporto al controllo posturale e permette di visualizzare lo spazio nel quale il corpo si trova, quindi, di modificarne la postura e i movimenti in relazione alle variabili ambientali. Il sistema visivo focalizza i raggi luminosi provenienti dall'esterno su coni e bastoncelli, ovvero fotorecettori presenti sulla retina che convertono l'energia luminosa in segnali elettrici per la trasmissione al Sistema Nervoso Centrale (SNC) attraverso il nervo ottico. Il suo intervento può essere ridotto, potenziando le informazioni provenienti dai sistemi vestibolare e propriocettivo, ciò può risultare positivo, soprattutto durante la pratica di alcune discipline sportive, poiché sistema propriocettivo ed apparato vestibolare si faranno maggiormente carico del controllo posturale, lasciando al sistema visivo il compito di focalizzarsi su informazioni specifiche.

Il sistema propriocettivo è formato da una serie di recettori che si trovano nelle articolazioni, nei muscoli e nei tendini, esso permette al soggetto di riconoscere la posizione del proprio corpo e delle sue parti rispetto allo spazio, riconoscendo inoltre lo stato di contrazione o rilassamento dei vari muscoli anche senza il supporto della vista. Nello specifico, nelle articolazioni sono presenti i meccanocettori, recettori sensoriali che andranno a rilevare le variazioni dell'angolo articolare di un determinato segmento corporeo, andando a misurare la deformazione della capsula articolare e dei legamenti.

I propriocettori muscolari, localizzati tra le fibre muscolari, sono i fusi neuromuscolari, i quali misurano la variazione di lunghezza del muscolo e la velocità con la quale questa avviene. In caso, di allungamento eccessivo o brusco, genereranno in risposta una contrazione protettiva riflessa. Infine, troviamo gli organi tendinei del Golgi, localizzati nel punto di congiunzione muscolo-tendineo, i quali rilevano uno stiramento eccessivo di tale giunzione provocato da una contrazione muscolare eccessiva. Essi possono essere dunque considerati come misuratori della forza muscolare. In caso di allungamento eccessivo tali organi provocheranno l'inibizione dei motoneuroni alfa e gamma generando uno stato di rilassamento muscolare. Si può dunque affermare che organi tendinei del Golgi e fusi neuromuscolari svolgono ruoli opposti. Inoltre, il controllo posturale è influenzato da molteplici fattori intrinseci all'individuo, come l'età, le caratteristiche antropometriche, lo stato fisiologico ma anche lo stato psicologico o psichiatrico. Si è notato, però, che in soggetti giovani e sani uno dei determinanti a lungo termine del controllo posturale, sia l'attività motoria praticata in maniera regolare per un periodo prolungato (Chow et al., 2016; Paillard, 2017a). Grazie alla plasticità delle strutture cerebrali che regolano le funzioni posturali, si svilupperanno adattamenti strutturali e funzionali che miglioreranno la performance di equilibrio e le strategie posturali annesse (Paillard, 2017a).

1.2 Strategie per il controllo dell'equilibrio

In presenza di perturbazioni esterne che vanno ad alterare lo stato di quiete di un soggetto, l'organismo mette in atto tre principali strategie di risposta posturale per mantenere l'equilibrio evitando così la caduta (Horak, 2006). Le prime due manterranno invariata la base d'appoggio, la terza invece andrà a modificare la base d'appoggio attraverso un passo.

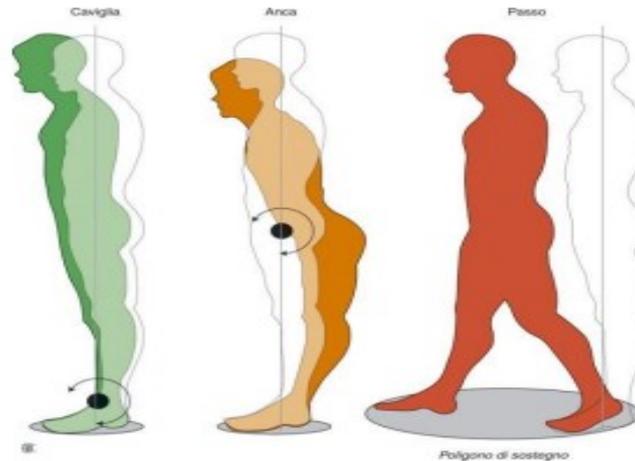


Figura 1.2: Illustrazione delle tre metodiche per il controllo dell'equilibrio.

La prima strategia viene definita come “strategia di caviglia”, in cui il corpo si muove rispetto alla caviglia come un pendolo inverso, flessibile mediante la co-contrazione di tutti i muscoli che permettono la flessione plantare e dorsale del piede. Questa strategia è principalmente attuata per mantenere l'equilibrio in presenza di piccole perturbazioni ma anche durante la stazione eretta in condizioni statiche.

La seconda strategia, nota come ‘strategia d'anca’, prevede la co-contrazione dei muscoli che si inseriscono sull'anca per spostare rapidamente il CoM. Questa strategia viene principalmente utilizzata per mantenere l'equilibrio in presenza di perturbazioni di media entità, quando il CoP si trova ai limiti della base d'appoggio e il CoM deve essere spostato velocemente.

La terza strategia viene definita come “strategia del passo”, in cui il soggetto per il mantenimento dell'equilibrio si trova costretto allo spostamento di un piede per aumentare la base d'appoggio. Tale strategia viene applicata poiché il CoP non riuscendo a bilanciare gli spostamenti del CoG, provoca l'uscita della sua proiezione a terra dalla base d'appoggio. Il passo andrà a costituire una nuova base di appoggio riportando il CoG all'interno di essa evitando così la caduta.

1.3 Apprendimento neurofisiologico

1.3.1 Il controllo anticipatorio

Le previsioni sulle conseguenze di un comando motorio o cognitivo originato dalla corteccia sono principalmente a carico del cervelletto, il quale è in grado di preparare l'intero sistema di controllo per far fronte ai cambiamenti in corso. Il riconoscimento della sequenza è il meccanismo attraverso cui il cervelletto opera nel controllo motorio anticipatorio, poiché esso interviene identificando schemi prevedibili di sequenze di comandi motori o cognitivi e collegandoli con conseguenze sensoriali o cognitive apprese generando risposte anticipatorie (Pisotta I et al., 2014).

Durante il movimento, le sensazioni “previste” vengono confrontate con le sensazioni effettivamente percepite; se le due sensazioni sono concordi, il modello di movimento verrà mantenuto anche per i movimenti successivi, se invece le due sensazioni non fossero concordi verrà inviato un segnale d'allerta alle aree motorie corticali e sottocorticali, le quali attiveranno la correzione del movimento attraverso un feedback. Tale processo permette al circuito cortico-cerebellare di agire come rivelatore di movimento e di rispondere in particolare a stimoli inaspettati (Restuccia et al., 2007).

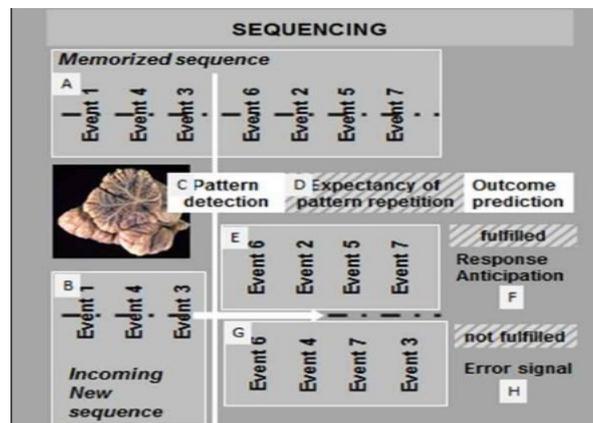


Figura 1.3: Meccanismo di sequenziamento cerebellare per la predizione (Pisotta I et al., 2014).

1.3.2 I riflessi

In fisiologia con il termine riflesso si intende una risposta motoria (o secretoria) involontaria mediata da componenti nervose, attuata per mantenere l'omeostasi, a seguito di uno stimolo proveniente dall'interno o dall'esterno del corpo. Tutti i riflessi vengono innescati da un recettore sensoriale che viene stimolato, il quale invia informazioni sensoriali sotto forma di potenziale d'azione, attraverso nervi afferenti, al sistema nervoso centrale il quale funge da centro di integrazione che seleziona la risposta più appropriata in base alle informazioni ricevute (attivando così i nervi efferenti che provocheranno la risposta muscolare o ghiandolare).

I movimenti riflessi non richiedono obbligatoriamente l'intervento della corteccia cerebrale, come nel caso di fusi neuromuscolari, o l'organo tendineo del Golgi che inviano le informazioni generano delle risposte muscolari mediate a livello spinale. Tali informazioni non verranno mai elaborate singolarmente ma verranno integrate tra di loro e con le informazioni provenienti dagli organi sensoriali in modo da fornire una risposta adeguata all'orientamento e all'equilibrio del corpo.

I riflessi possono essere divisi in due macrocategorie: (i) riflessi corticali, i quali vedono come sito di integrazione ed elaborazione delle informazioni l'encefalo ed (ii) i riflessi spinali, i quali vedono come sito di integrazione ed elaborazione delle informazioni il midollo spinale. Nel caso dei riflessi attuati per il controllo posturale, Paterna e colleghi (M. Paterna et al., 2018) hanno suggerito che le informazioni afferenti vengono trasportate ai centri nervosi andando ad utilizzare nervi afferenti di diametro maggiore, questo per andare ad aumentare la velocità di trasmissione del segnale (tra gli 80 ed i 120 m/s).

1.4 Scopo dello studio

Lo scopo di questo studio è verificare se l'esposizione continua a perturbazioni esterne di tipo randomico (della durata di 30 secondi), indotte mediante traslazione della base d'appoggio utilizzando di una pedana azionata con un cilindro elettro-attuato (Shaker Table), possa influenzare la risposta posturale del soggetto ad una successiva perturbazione puntuale e improvvisa della base d'appoggio.

Inoltre, durante questo studio i soggetti sono stati sottoposti a cinque stimoli continui randomici (RND) ripetuti in due prove sperimentali, in ogni soggetto con ordine diverso e casuale. Tale procedura aveva lo scopo di verificare se il ripetersi di uno stesso stimolo portasse ad un effetto apprendimento indipendentemente dall'ordine delle prove.

2 MATERIALE E METODI

2.1 Partecipanti

Hanno partecipato allo studio 27 soggetti sani, suddivisi in 14 soggetti di sesso femminile e 13 soggetti di sesso maschile di età compresa tra i 20 ed i 25 anni (21.56 ± 1.31 anni), peso tra i 46 ed i 108 kg (72.30 ± 16.06 kg) e altezza compresa tra 1.58 e 1.87 m (1.71 ± 0.14 m). I soggetti prima di aderire al progetto di ricerca sono stati informati circa le modalità dello studio attraverso una prima spiegazione introduttiva da parte del ricercatore e in seguito tramite consenso informato, firmato dai soggetti prima dell'inizio dei test.

2.2 Strumentazione

2.2.1 Shaker Table

Il dispositivo Shaker Table è una pedana mobile (135x135 cm), che tramite un cilindro elettro-attuato consente movimentazioni della base d'appoggio in direzione antero-posteriore per uno spostamento massimo di 135 mm ad una velocità massima di 700 mm/s. Il movimento della pedana avviene mediante lo scorrimento su cuscinetti a sfera. Il cilindro che permette il movimento della pedana è azionato e controllato dal sistema RTC-9001 (LiTem Life Testing Machines, LiTeM, figura 2.1A). I parametri di velocità e spostamento sono impostati mediante software dedicato 2-Axis Dynamic Testing System installato su computer (2.1B).



(figura A)



(figura B)

Figura 2.1: interfaccia del software Real Time Test Controller RTC-9000 (figura A) utilizzato per impostare i parametri della Shaker Table (velocità, direzione e spostamento) e Shaker table più portale di ancoraggio con imbragatura (figura B).

È inoltre presente un portale dove, mediante apposite cinghie, è fissata una imbragatura (figura 2.1B), indossata dal soggetto durante i test come misura cautelativa in caso di perdita d'equilibrio per evitare la caduta del soggetto.

2.2.2 Pedana dinamometrica

La pedana dinamometrica permette la misurazione delle forze scambiate tra il soggetto e la base d'appoggio, scomponendo la forza nelle sue tre componenti rispetto allo spazio: antero-posteriore, medio-laterale e verticale. Mediante l'utilizzo di tali forze è possibile calcolare il CoP ovvero il punto in cui è applicata la risultante delle forze scambiate tra soggetto e superficie d'appoggio. La pedana di forza (AMTI BP6040) è stata collocata al di sopra della Shaker Table mediante appositi ancoraggi, in modo da poter misurare la traiettoria del CoP durante le prove con spostamento. I dati del CoP sono stati registrati mediante il software Balance clinic (Advanced, Mechanical Technology, Inc.). La sincronizzazione dei 2 sistemi (Shaker Table e pedana di forza) è avvenuta offline mediante l'impiego di una trigger box esterna che inviava un segnale TTL ad entrambi i sistemi durante l'acquisizione delle prove.



Figura 2.2: pedana Dinamometrica AMTI BP6040 e pannello di controllo del software Balance Clinic.

2.3 Protocollo sperimentale

2.3.1 Prove statiche e dinamiche

Lo studio è stato condotto presso il Dipartimento di Scienze Biomediche (DSB) dell'Università degli studi di Padova. Ciascun soggetto ha eseguito 18 prove di equilibrio suddivise rispettivamente in: cinque prove di equilibrio statico, tre prove per il calcolo dei limiti di stabilità e dieci prove di equilibrio dinamico.

Quest'ultime venivano eseguite in due sessioni, le quali variavano solamente per la tipologia di prove di equilibrio dinamico: RANDOM E CONTROLLO (no perturbazione continua), mentre le prove di equilibrio statico e i limiti di stabilità venivano ripetuti con la medesima modalità esecutiva. Le tre sessioni sperimentali erano svolte in giorni diversi e dovevano essere intervallate tra di esse da un periodo di almeno 48 ore e concluse nell'arco di due settimane.



Figura 2.3: dima per il corretto posizionamento dei piedi per le prove statiche.

EQUILIBRIO STATICO: In queste cinque prove della durata di 30 secondi ciascuna, il soggetto posizionava i piedi sulla pedana di forza con i talloni a 7 cm tra loro e un angolo tra i piedi di 30° mediante una dima. Durante le prove di equilibrio statico, il soggetto doveva mantenere una postura eretta con le mani lungo i fianchi e fissare una mira ottica posta di fronte a sé a 2 metri di distanza.

LIMITI DI STABILITÀ: In queste tre prove il soggetto posizionava i piedi a suo piacimento sulla pedana dinamometrica. La posizione dei piedi veniva fissata dallo sperimentatore e mantenuta dal soggetto anche durante le prove di equilibrio dinamico. Una volta posizionato il soggetto, lo sperimentatore dava il via alla prova. Al soggetto era richiesta l'esecuzione di uno sbilanciamento volontario, anteriormente e posteriormente. L'esecuzione della prova doveva avvenire senza sollevare i piedi da terra e mantenendo le ginocchia estese, con le mani lungo i fianchi.

PROVE DI EQUILIBRIO DINAMICO: Ciascuna prova della durata di 80 secondi era così suddivisa:

- Nei 5 secondi iniziali la pedana non produceva alcuno stimolo.
- Nei successivi 30 secondi la pedana si muoveva in modo casuale (RND) in direzione antero-posteriore, o non si muoveva (CTRL).
- Al termine dei 30 secondi, dopo un tempo di attesa di 10 secondi, veniva somministrata al soggetto un'ulteriore perturbazione impulsiva, ovvero uno spostamento postero-anteriore della base d'appoggio di 100 mm alla velocità di 200 mm/s. Tuttavia, per evitare un effetto ideomotorio, venivano somministrate 5 perturbazioni impulsive all'interno di un totale di 10 prove di ciascuna tipologia (RND o CTRL) in maniera casuale.

Nel caso il soggetto muovesse i piedi durante le perturbazioni, le prove erano considerate valide.

2.3.2 Procedura sperimentale

La procedura sperimentale prevedeva:

- Somministrazione del modulo consenso informato.
- Randomizzazione delle prove dinamiche nelle due sessioni sperimentali.
- Spiegazione delle prove e familiarizzazione con i movimenti della Shaker Table.
- Esecuzione delle prove secondo quanto descritto nel paragrafo precedente.

Durante ogni sessione sperimentale veniva compilato un “foglio prove” dove veniva segnato l’ordine di esecuzione delle prove: le prime otto prove (statiche e limiti di stabilità) seguivano sempre lo stesso ordine, mentre le successive dieci (perturbazione continua) venivano randomizzate. Nel foglio prove, riportato di seguito a titolo esemplificativo, venivano annotati: il nome del file AMTI (file di salvataggio della pedana di forza), le note riguardanti il test ove necessario e le condizioni sperimentali delle dieci prove dinamiche.

COGNOME	NOME	DATA PROVA		CONDIZIONE
SETTINGS Shaker Table	ID PROVA	ORDINE PROVA	FILE AMTI	NOTE
STATICA 1	/	/		
STATICA 2	/	/		
STATICA 3	/	/		
STATICA 4	/	/		
STATICA 5	/	/		
LOS 1	/	/		
LOS 2	/	/		
LOS 3	/	/		
TRIAL 1	1	9		
TRIAL 2	2	10		
TRIAL 3	3	8		
TRIAL 4	4	1		
TRIAL 5	5	7		
TRIAL 1 NP	6	3		
TRIAL 2 NP	7	5		
TRIAL 3 NP	8	4		
TRIAL 4 NP	9	6		
TRIAL 5 NP	10	2		

Figura 2.4: Esempio del foglio prove utilizzato per indicare l’ordine delle prove eseguite.

3 ANALISI DATI E RISULTATI

3.1 Analisi dati

L'analisi dati è stata possibile dapprima grazie all'integrazione e alla sincronizzazione dei dati provenienti dalla pedana di forza e dalla Shaker Table attraverso una trigger box, la quale ha permesso di individuare i periodi di analisi della perturbazione continua (CP) e di perturbazione improvvisa (RR, Ramp Rate).

3.1.1 Analisi dati CoP

L'analisi dati dei parametri derivanti dalla traiettoria del CoP è stata effettuata tramite il software Matlab R2024b (TheMathWorks, Inc., MA, United States), attraverso il quale sono stati analizzati i seguenti parametri:

- 1) Area dell'ellisse di confidenza (Area95).
- 2) Unit Path (UP).
- 3) First peak (FP).
- 4) Post Perturbation Variability (PPV).

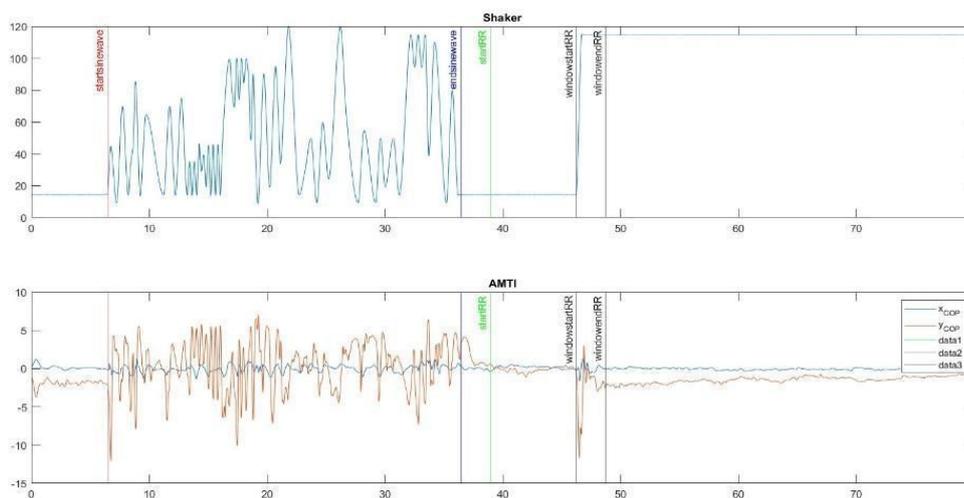


Figura 3.1: Grafico MatLab in cui vengono comparati movimenti della pedana e movimenti del CoP. Si possono notare oscillazioni antero-posteriori e medio-laterali.

L'Area95 identifica l'area che contiene la traiettoria del CoP con un intervallo di confidenza del 95%. Minore è il valore di Area95, migliore è il controllo posturale (Paillard & Noé, 2015). Con UP identifichiamo, invece, la velocità media di spostamento del CoP. Minore è la velocità, più efficiente è il controllo posturale del soggetto. Si può affermare quindi che a parità di Area95, è meno efficiente il soggetto che oscilla più velocemente perché attua più correzioni nell'unità di tempo. Tali parametri sono stati analizzati sia durante il periodo di perturbazione continua, in una finestra temporale di analisi della durata di 30 secondi, sia in quello di perturbazione improvvisa, in una finestra temporale di analisi della durata di 2.5 secondi. Ai fini dell'analisi statistica, è stata effettuata la media dei valori nelle cinque prove sia per Area95 che per UP.

Inoltre, all'interno della finestra di analisi di 2.5 s corrispondente alla perturbazione improvvisa, sono state analizzate due ulteriori variabili: FP e PPV. Per il calcolo di FP e PPV, la traiettoria del CoP è stata suddivisa in finestre temporali di 2.5 secondi a partire dall'istante in cui veniva somministrata la perturbazione esterna (perturbation point, PP) Il FP corrisponde al picco minimo rilevato nell'asse delle y (antero-posteriore) dopo il PP. La PPV rappresenta la deviazione standard all'interno della finestra temporale di 2.5 s dopo la perturbazione; più è alto il suo valore, maggiore è l'oscillazione del CoP.

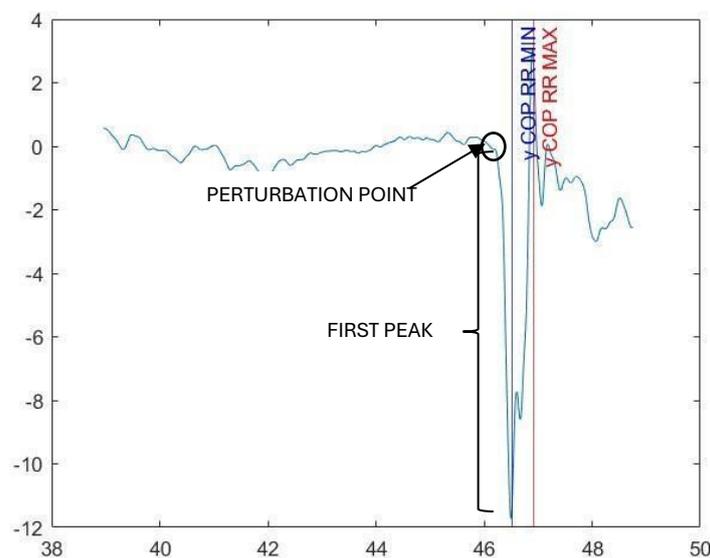


Figura 3.2: Rappresentazione grafica del first peak (FP).

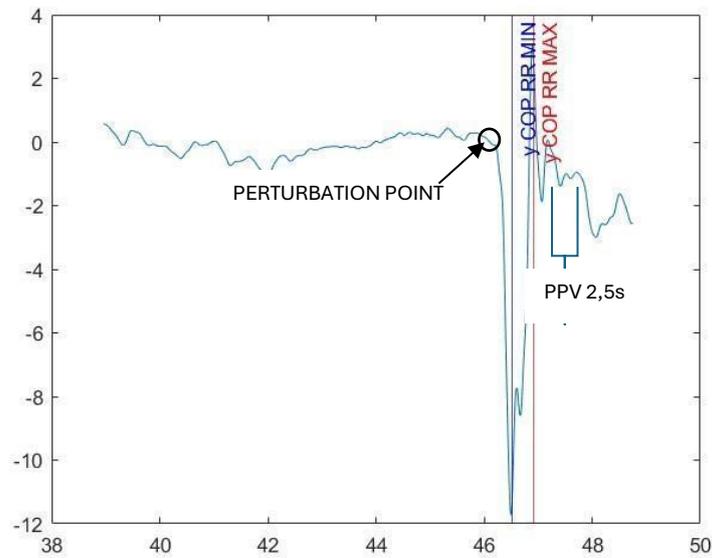


Figura 3.3: Rappresentazione grafica del Post Perturbation Variability (PPV).

3.2 Analisi statistica

L'analisi statistica è stata eseguita mediante il software Jasp (versione 0.19.0.0). In primo luogo, è stato eseguito un test di normalità (Shapiro-Wilk) per tutte le variabili sperimentali, con esito positivo è stato eseguito un test statistico parametrico (T-Test). Nello specifico, per le variabili Area95 e UP, è stato utilizzato un T-Test per campioni appaiati per investigare eventuali differenze statisticamente significative tra le medie a durante la perturbazione continua tra T0 e T1, con T0 che corrisponde alla prima applicazione di una perturbazione continua randomica, mentre T1 corrisponde alla seconda applicazione della stessa tipologia di perturbazione attuata in T0. Successivamente, sempre con t- test per campioni appaiati, si sono confrontati i parametri di UP, Area95, FP e PPV durante la perturbazione improvvisa per confrontare la condizione CTRL (nessuna perturbazione precedente allo stimolo) con la condizione RND (perturbazione continua di tipo randomico). Un valore di $p < 0.05$ è stato impostato per indentificare la significatività statistica.

Test of Normality (Shapiro-Wilk) ▼

			W	p
UP_CP_RND t0	-	UP_CP_RND t1	0.980	0.859
AREA95_RR_CTRL	-	AREA95_RR_RND	0.944	0.153
UP_RR_CTRL	-	UP_RR_RND	0.942	0.136
FP_RR_CTRL	-	FP_RR_RND	0.964	0.463
PPV_RR_CTRL	-	PPV_RR_RND	0.950	0.215
AREA95_CP_RND t0	-	AREA95_CP_RND t1	0.811	< .001

Note. Significant results suggest a deviation from normality.

Figura 3.4: Tabella riassuntiva del test di normalità.

Paired Samples T-Test ▼

Measure 1	Measure 2	Test	Statistic	z	df	p	Effect Size	SE Effect Size	95% CI for Effect Size		
									Lower	Upper	
UP_CP_RND t0	-	UP_CP_RND t1	Student	8.232		26	< .001	1.584	0.083	1.007	2.148
			Wilcoxon	374.000	4.445		< .001	0.979	0.217	0.951	0.991
AREA95_RR_CTRL	-	AREA95_RR_RND	Student	5.634		26	< .001	1.084	0.316	0.600	1.555
			Wilcoxon	364.000	4.204		< .001	0.926	0.217	0.833	0.968
UP_RR_CTRL	-	UP_RR_RND	Student	5.664		26	< .001	1.090	0.237	0.605	1.562
			Wilcoxon	363.000	4.180		< .001	0.921	0.217	0.822	0.966
FP_RR_CTRL	-	FP_RR_RND	Student	2.964		26	0.006	0.570	0.282	0.158	0.973
			Wilcoxon	294.000	2.523		0.010	0.556	0.217	0.192	0.785
PPV_RR_CTRL	-	PPV_RR_RND	Student	4.812		26	< .001	0.926	0.317	0.467	1.373
			Wilcoxon	348.000	3.820		< .001	0.841	0.217	0.661	0.930
AREA95_CP_RND t0	-	AREA95_CP_RND t1	Student	3.443		26	0.002	0.663	0.163	0.240	1.075
			Wilcoxon	332.000	3.436		< .001	0.757	0.217	0.505	0.890

Note. For the Student t-test, effect size is given by Cohen's *d*. For the Wilcoxon test, effect size is given by the matched rank biserial correlation.

Figura 3.5: Tabella riassuntiva del T-Test.

3.3 Risultati

3.3.1 Perturbazione continua

I parametri UP e Area95, valutati durante la somministrazione della perturbazione continua, hanno evidenziato un miglioramento altamente significativo ($p < 0.001$) del controllo posturale nel confronto T0 vs. T1, con una riduzione dei valori in entrambi i parametri.

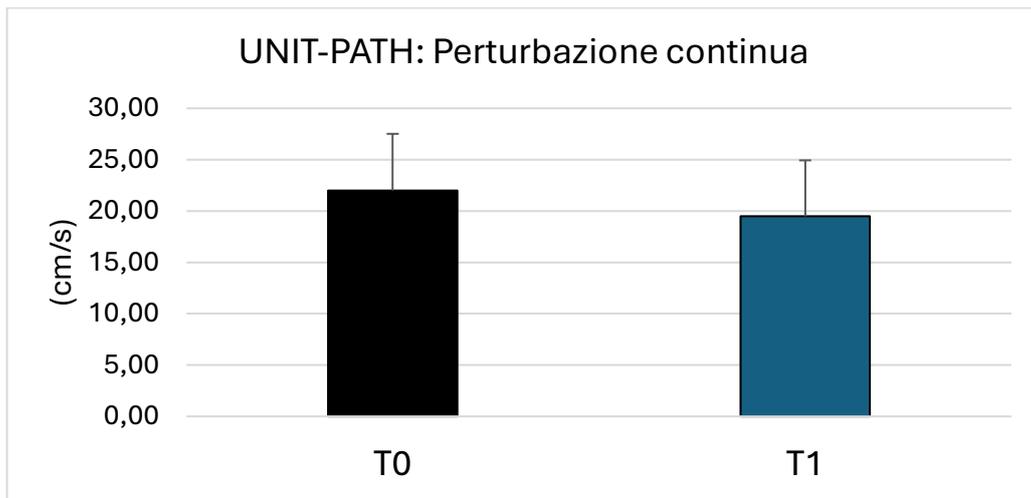


Figura 3.6: Risultati Unit Path perturbazione continua.

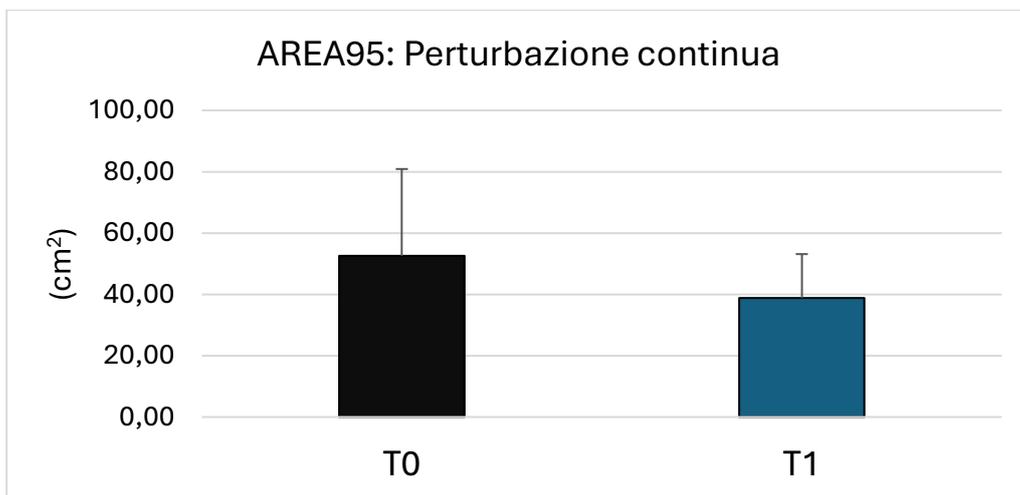


Figura 3.7: Risultati Area dell'ellisse di confidenza perturbazione continua.

3.3.2 Perturbazione improvvisa

In questo caso i parametri analizzati, UP, Area95, FP e PPV, sono stati confrontati tra la condizione CTRL (quiete antecedente alla perturbazione improvvisa) e RND (con perturbazione continua antecedente alla perturbazione improvvisa). Dal confronto è emerso come tutti i parametri analizzati siano differenti in modo statisticamente significativo ($p < 0.001$) tra le due condizioni, con valori più bassi osservati nella condizione RND.

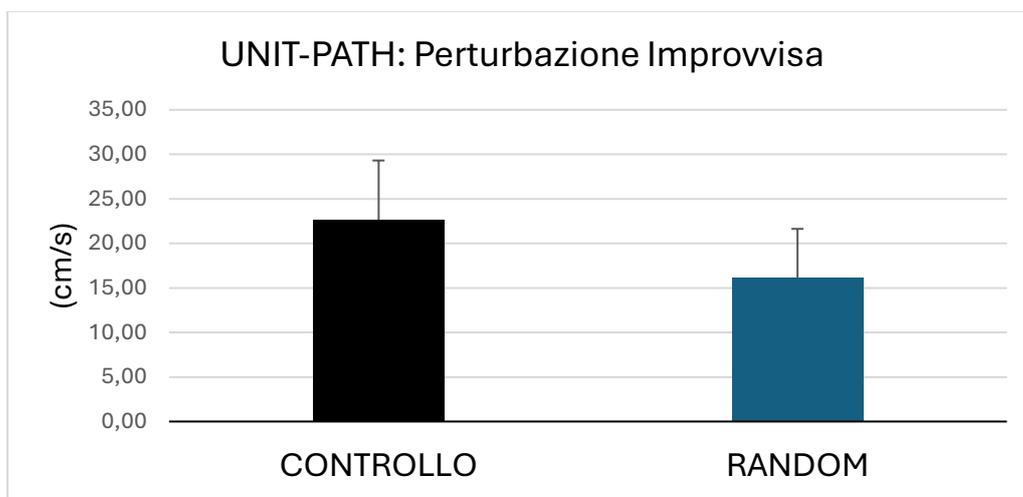


Figura 3.8: Risultati Unit Path perturbazione improvvisa.

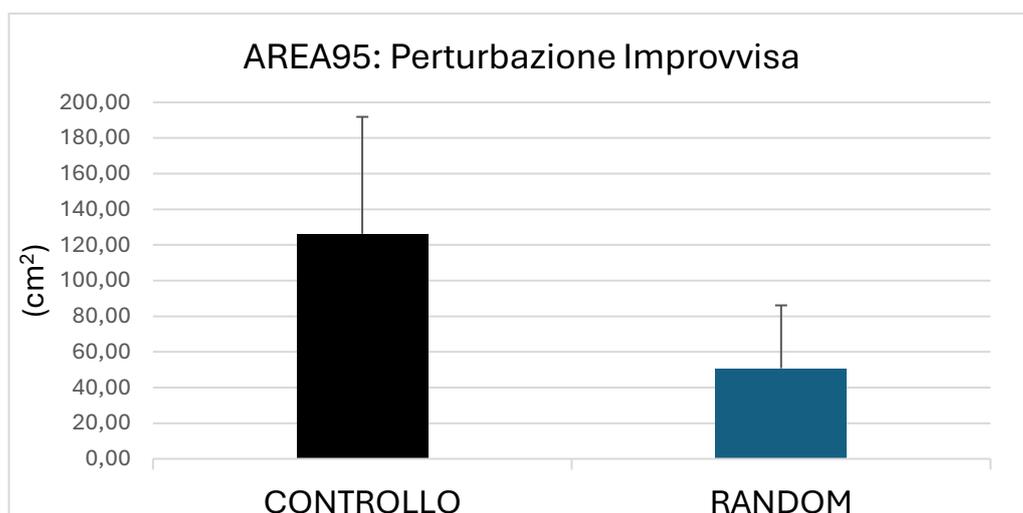


Figura 3.9: Risultati Area dell'ellisse di confidenza perturbazione improvvisa.

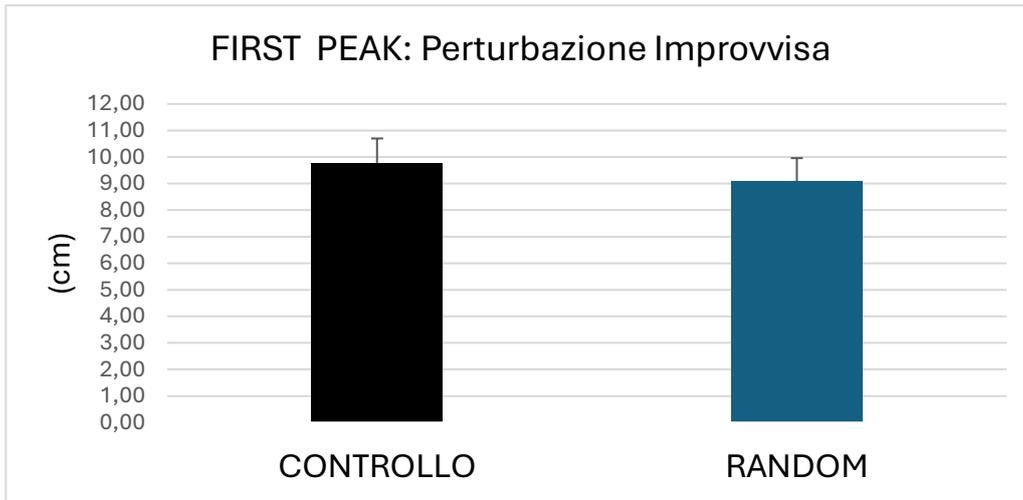


Figura 3.10: Risultati First Peak perturbazione improvvisa.

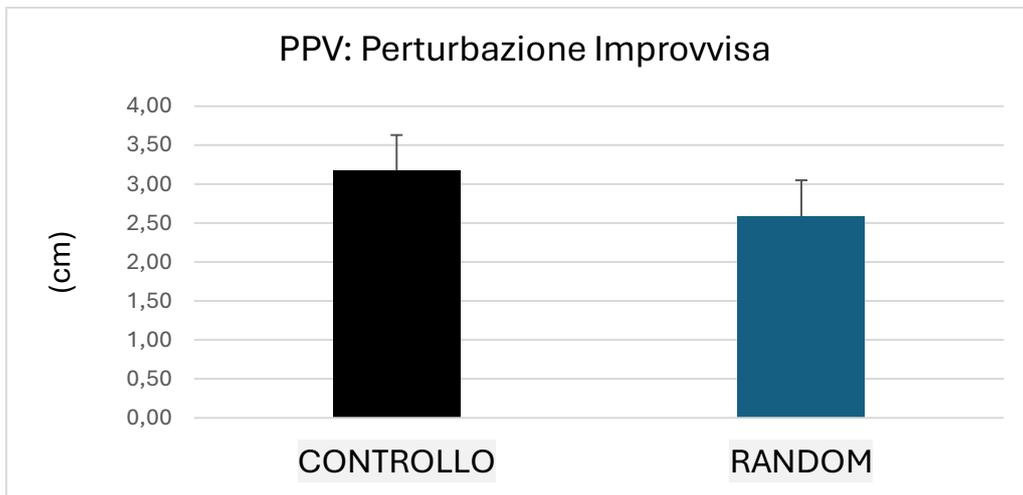


Figura 3.11: Risultati Post Perturbation Variability perturbazione improvvisa.

4 CONCLUSIONI

L'ipotesi iniziale di questo studio era che la somministrazione di una perturbazione continua di tipo randomico, applicata precedentemente ad una perturbazione improvvisa, migliorasse i parametri del CoP (UP, Area95, FP e PPV) misurati durante tale perturbazione. Inoltre, è stato ipotizzato che l'esecuzione dello stesso stimolo per una seconda volta portasse al miglioramento dei parametri valutati durante la perturbazione continua (UP, Area95).

I risultati dello studio hanno evidenziato come vi sia stato un miglioramento altamente significativo dei valori di UP, Area95, FP e PPV durante l'esecuzione dei test che presentavano una perturbazione continua randomica precedente alla perturbazione improvvisa rispetto ai test nei quali non vi era nessuna tipologia di stimolo. Il SNC regola il livello di attività muscolare per contrastare gli effetti destabilizzanti delle perturbazioni. Inoltre, il SNC ottimizza le risposte cinematiche e cinetiche ritardando leggermente l'inizio della rotazione in avanti del corpo, mantenendo invariato il modello temporale di attivazione muscolare posturale (Schmid et al, 2016).

Tali risultati hanno evidenziato anche come i parametri di UP ed Area95 misurati durante la perturbazione continua migliorassero in maniera altamente significativa durante la seconda esecuzione della stessa tipologia di perturbazione. Ciò ha dimostrato che, grazie alla ripetizione di una stessa tipologia di stimolo, vi sia un effetto apprendimento e che tale effetto sia presente indipendentemente dall'ordine con cui le prove venivano somministrate. Infatti, il cervello controlla i nostri muscoli posturali, attivando risposte riflesse di breve e lunga latenza, preparando attività anticipatorie una volta note le caratteristiche della perturbazione e mettendo in atto attività correttive quando le reazioni non sono perfettamente calibrate (Ghai et al, 2019). Pertanto, lo spostamento continuo antero-posteriore della base di supporto, stimola la nostra capacità di equilibrio e facilita una migliore gestione dello stesso alla seconda somministrazione dello stimolo, grazie a risposte posturali anticipatorie.

Sarebbe inoltre interessante approfondire tale ricerca integrando ai test di equilibrio la registrazione dell'attività elettromiografica dei principali muscoli coinvolti (grande, medio e piccolo gluteo, quadricipite, bicipite femorale, soleo, gastrocnemio e tibiale anteriore) per il mantenimento dell'equilibrio e l'analisi cinematica del movimento, per verificare come determinate attivazioni muscolari o movimenti di sezioni corporee possano contribuire ai meccanismi di controllo posturale.

Applicare il presente protocollo sperimentale in un campione di soggetti anziani o in campione con particolari deficit di equilibrio, potrebbe essere utile per investigare se una perturbazione di tipo continuo randomico applicata in cronico o come forma di allenamento possa portare ad un miglioramento dell'equilibrio durante la vita di tutti i giorni. In conclusione, possiamo affermare che i risultati di questo studio confermano le ipotesi iniziali con una significatività elevata e che tale studio possa portare un contributo concreto alla ricerca dei meccanismi di adattamento del controllo motorio.

5 BIBLIOGRAFIA

1. Paillard, T. (2017a). Plasticity of the postural function to sport and/or motor experience. In *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* (Vol. 72).
2. Paillard, T. (2017b). Relationship between muscle function, muscle typology and postural performance according to different postural conditions in young and older adults. In *Frontiers in Physiology* (Vol. 8, Issue AUG).
3. Takakusaki, K. (2017). Functional neuroanatomy for posture and gait control. *Journal of movement disorders*, 10(1), 1.
4. Wang, H., Ji, Z., Jiang, G., Liu, W., & Jiao, X. (2016). Correlation among proprioception, muscle strength, and balance. *Journal of Physical Therapy Science*, 28(12)
5. Horak, F. 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), ii7-ii11.
6. Pisotta, I., & Molinari, M. (2014). Cerebellar contribution to feedforward control of locomotion. *Frontiers in human neuroscience*, 8, 475.
7. Restuccia, D., Marca, G. D., Valeriani, M., Leggio, M. G., & Molinari, M. (2007). Cerebellar damage impairs detection of somatosensory input changes. A somatosensory mismatch-negativity study. *Brain*, 130(1), 276-287.
8. Restuccia, D., Marca, G. D., Valeriani, M., Leggio, M. G., & Molinari, M. (2007). Cerebellar damage impairs detection of somatosensory input changes. A somatosensory mismatch-negativity study. *Brain*, 130(1), 276-287.
9. Schmid, M., & Sozzi, S. (2016). Temporal features of postural adaptation strategy to prolonged and repeatable balance perturbation. *Neuroscience letters*, 628, 110-115.
10. Ghai, Shashank, Antonio Nardone, and Marco Schieppati. 2019. "Human Balance in Response to Continuous, Predictable Translations of the Support Base: Integration of Sensory Information, Adaptation to Perturbations, and the Effect of Age, Neuropathy and Parkinson
11. M. Bozzato, G. Marcolin, Effetto di un programma di attività motoria di 12 settimane con dispositivi destabilizzanti sulla forza e l'equilibrio in una popolazione di anziani, Padova: 2022.