



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Biomedica

**STUDIO DEL CENTRO DI PRESSIONE IN POSTURA STATICA
MEDIANTE ANALISI DI PUNTI DI AGGREGAZIONE SPAZIALI E
TEMPORALI**

**STUDY OF THE PRESSURE CENTRE IN STATIC POSTURE BY
ANALYZING SPATIAL AND TEMPORAL AGGREGATION POINTS**

Relatore:

Prof.ssa Federica Verdini

Correlatori:

Prof. Alessandro Mengarelli

Dr. Andrea Tigrini

Tesi di Laurea di:

Emi Sgolastra

A.A. 2023/2024

INDICE

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ABSTRACT | 3 |
| 1. INTRODUZIONE | 5 |
| 1.1. La postura | 5 |
| 1.2. La stabilità posturale | 7 |
| 1.3. Il controllo posturale | 10 |
| 1.4. Le strategie del controllo posturale | 12 |
| 2. MATERIALI E METODI | 16 |
| 2.1. La piattaforma di forza | 16 |
| 2.2. I soggetti e le prove | 18 |
| 2.3. Il processamento dei dati | 21 |
| 3. RISULTATI | 26 |
| 3.1. Analisi del numero medio di celle con occorrenze maggiori di specifiche soglie | 31 |
| 3.2. Analisi del range medio di celle occupate con occorrenze maggiori di zero | 34 |
| 3.3. Analisi del numero medio di celle con occorrenze maggiori di specifiche soglie | 36 |
| 3.4. Analisi della posizione e del numero di celle con occorrenze maggiori di specifiche soglie | 40 |
| 3.5. Analisi statistica | 44 |
| CONCLUSIONI | 52 |
| BIBLIOGRAFIA | 54 |

ABSTRACT

Il seguente lavoro di tesi presenta i risultati di uno studio della postura basato sull'analisi delle oscillazioni del centro di pressione registrate durante prove di stabilometria statica. La perdita di efficienza da parte del sistema adibito al controllo posturale, dovuta all'età avanzata o all'effetto di alcune patologie, ha portato la ricerca ad analizzare in modo sempre più approfondito, il funzionamento del mantenimento dell'equilibrio.

L'analisi che viene svolta si focalizza sul centro di pressione e si propone una valutazione grafica basata su una rappresentazione con mappe che mostrano i punti di aggregazione in termini spaziali e temporali della traiettoria dello statokinesiogramma. L'obiettivo è quello di individuare le zone di maggiore incidenza della traiettoria, registrata dal centro di pressione durante la prova statica, al fine di ricercare delle metriche e dei parametri caratteristici per una specifica popolazione di soggetti, e per una determinata condizione.

In una prima parte del presente documento si analizza e descrive la postura, in particolare evidenziando come avviene il controllo umano durante prove statiche in posizione eretta. I meccanismi per il mantenimento dell'equilibrio sono molteplici e complessi, e la stabilità del corpo è influenzata da diversi fattori, interni o esterni al soggetto, che caratterizzano i movimenti del centro di pressione.

In seguito, nella parte sperimentale, si illustrano i materiali e i metodi utilizzati per lo studio del centro di pressione e la sua traiettoria, con la successiva ricerca dei parametri significativi. I dati utilizzati sono stati selezionati da un dataset già realizzato, pubblicato dall'articolo scientifico: "A public data set of human balance evaluations" (di D. Santos e M. Duarte, anno di pubblicazione 2016), che fornisce le misure acquisite durante prove di stabilometria statica della durata di un minuto. In particolare, l'analisi è stata svolta considerando due popolazioni (soggetti sani e soggetti con deficit o patologie), con prove in differenti modalità (prove ad occhi aperti o occhi chiusi, su superficie stabile o su superficie compliant). Lo scopo è quello di studiare soggetti diversi, in diverse condizioni, al fine di valutare come varia il controllo posturale imponendo, ad esempio, la mancanza di input visivi (prove ad occhi chiusi) o aumentando la difficoltà della prova statica (somministrando stimoli propriocettivi differenti facendo restare il soggetto in stazione eretta su superfici di per sé instabili). Nel presente lavoro lo statokinesiogramma del centro di pressione viene rappresentato graficamente su un piano

sfruttando mappe di calore, dalle quali si ricercano degli indici caratteristici. Le mappe di calore (*heatmap*) ci consentono di analizzare dei dati tramite variazioni di intensità di colore. L'implementazione è stata eseguita con un codice MATLAB e sono stati selezionati quattro parametri significativi per caratterizzare le prove statiche. In particolare, le metriche scelte analizzano la persistenza in un determinato punto e la dispersione, dei dati della traiettoria del centro di pressione. I quattro parametri calcolati sono i seguenti:

- 1) il numero medio di punti nelle mappe con occorrenze maggiori di specifiche soglie scelte (valuta il tempo di persistenza del centro di pressione in determinate porzioni);
- 2) il range medio dei punti occupati, nelle mappe rappresentate, con occorrenze maggiori di zero (valuta la dispersione e la variabilità del centro di pressione durante la prova);
- 3) il valore numerico medio associato a tutti i punti delle mappe con occorrenze maggiori di specifiche soglie scelte (valuta sia il tempo di persistenza del centro di pressione che la sua dispersione);
- 4) la posizione e il numero dei punti nelle mappe con occorrenze maggiori di specifiche soglie scelte: in quale quadrante della piattaforma di forza si trovano e quante sono numericamente in quel dato quadrante (valuta la posizione del centro di pressione ed eventuali zone di particolare confidenza durante la prova).

Infine, si presentano i risultati dell'analisi statistica delle metriche scelte per valutare se le differenze notate risultano statisticamente significative.

L'idea di descrivere la traiettoria del centro di pressione con un'immagine bidimensionale, sfruttando una mappa che rappresenta una matrice di dati con variazioni di colore, è del tutto nuova. Per descrivere l'equilibrio e il controllo posturale ci sono molteplici parametri noti e di assoluta importanza che ci consentono di analizzare lo statokinesigramma in termini sia spaziali che temporali. In questo lavoro si è cercato di sfruttare una tecnica grafica al fine di ottenere nuovi parametri che potessero descrivere allo stesso modo il tempo di persistenza in uno specifico punto e lo spazio occupato dalla traiettoria del centro di pressione.

1. INTRODUZIONE

La stabilità posturale, altrimenti detta equilibrio, è una componente di vitale importanza per la qualità della vita, una capacità fondamentale sia per portare a termine le più semplici azioni quotidiane, come mantenere una corretta postura eretta e camminare evitando eventuali ostacoli, sia per compiere i movimenti più articolati e complicati come quelli, ad esempio, richiesti durante l'esecuzione di un gesto sportivo [1]. Questa capacità cresce e migliora con lo sviluppo psicofisico della persona, per poi deteriorarsi con l'avanzare dell'età. Non per tutti è sviluppata allo stesso livello, ma come la maggior parte delle capacità umane, può essere stimolata e migliorata.

1.1 La postura

La postura può essere definita come qualsiasi posizione che consente il mantenimento dell'equilibrio con la massima stabilità, il minor consumo energetico e il minore stress delle strutture anatomiche [2]. Una corretta postura mantiene il bilanciamento dell'individuo e allo stesso tempo protegge le strutture portanti del corpo da lesioni e deformità progressive. La postura è quindi la posizione che l'individuo assume nello spazio adattandosi e opponendosi all'azione della forza di gravità che attrae verso il suolo. I fattori che contribuiscono al mantenimento della postura sono molteplici: da quello neurofisiologico e biomeccanico a quello psicoemotivo. L'abilità di controllare la posizione del nostro corpo nello spazio emerge da una complessa interazione dei sistemi muscolo-scheletrico e nervoso, insieme definiti come "sistema del controllo posturale".

Nell'ambito della postura ci sono tre concetti chiave di fondamentale importanza [3]:

- spazialità: la posizione assunta nello spazio dal corpo e quella relativa tra i vari segmenti corporei;
- antigrafità: l'equilibrio posturale si esprime in risposta alla forza di gravità;
- equilibrio: la relazione esistente tra il soggetto e l'ambiente circostante.

L'obiettivo principale della postura è quindi il mantenimento dell'equilibrio sia in condizione statiche, sia in condizioni dinamiche. Una corretta esecuzione viene garantita da un sistema particolarmente sofisticato e accurato con la cooperazione di diversi sistemi sensoriali [4, 5]:

- sistema somatosensoriale, il sistema più rapido in grado di informare ad elevata velocità i centri nervosi a livello spinale e tronco-encefalico, in quanto utilizza le fibre nervose più grandi (velocità di 80-120 ms). Inoltre, è in grado di registrare le diverse sensazioni di pressione e contrazione e di conseguenza determinare la posizione reciproca fra le diverse parti del corpo e la superficie d'appoggio¹, è responsabile della risposta efferente tramite la modulazione della risposta muscolare;
- sistema visivo, il sistema che trasmette le informazioni relative al movimento e alla posizione del capo infatti, tramite esso, il cervello acquisisce più dell'80% delle informazioni esterne riguardanti i cambiamenti che avvengono nell'ambiente circostante e, tramite le connessioni neuro-motorie, regola in tempo reale le funzioni statiche e dinamiche del corpo (funzione propriocettiva);
- sistema vestibolare, il sistema più tardivo ad attivarsi in quanto presenta una soglia di attivazione più elevata che permette agli altri due sistemi di agire in modo più preciso gestendo la maggior parte delle situazioni di disequilibrio. Si tratta infatti di un sistema che agisce in situazioni "di emergenza", ha il compito di rilevare le variazioni riguardanti la posizione, la velocità e le accelerazioni tangenziali del capo quando i movimenti superano una certa ampiezza e velocità, rendendo possibile il corretto posizionamento degli occhi.

Le informazioni raccolte da questi tre sistemi sono parzialmente ridondanti e questo permette di poterle compensare nel caso uno dei sistemi sia carente o difettoso. Se, invece, le informazioni provenienti da due sistemi differenti si trovano in conflitto, si genera uno squilibrio causato da una non corrispondenza (*mismatch*) tra il segnale aspettato e quello realmente ricevuto.

Essendo il controllo posturale una funzione decisamente complessa, possono insorgere difficoltà di varia natura nella sua gestione a seconda dell'età del soggetto: per i bambini nei

¹ La zona sottostante, restando in posizione eretta, compresa fra i due piedi e delimitata da due linee che collegano rispettivamente le punte delle dita e dei talloni, è detto anche base/superficie di supporto.

primi anni, a causa della mancata maturazione delle vie nervose e lo scarso tono posturale, per gli anziani, come conseguenza del deteriorarsi degli organi ricettivi e per la perdita di tono muscolare.

Alcuni studi [6], hanno evidenziato il ruolo delle informazioni provenienti dal sistema somatosensoriale, visivo e vestibolare nella coordinazione delle risposte posturali. Chi presenta carenze della sensibilità somatica produce una maggiore escursione del centro di pressione, in particolare ad occhi chiusi. Inoltre [7], in un individuo in posizione eretta e con gli occhi chiusi, l'inclinazione posturale può aumentare dal 20% al 70%. Infine, pazienti con deficit vestibolari possono presentare una mancata coordinazione nel cammino e grave alterazione dell'equilibrio con conseguenti vertigini e nausea [8].

La perdita di efficacia dovuta all'età avanzata o all'effetto di alcune patologie degenerative, da parte del sistema adibito al controllo posturale, ha portato la ricerca a determinare e quantificare i fenomeni che stanno alla base del mantenimento dell'equilibrio. Il sistema visivo è quello che può essere più facilmente controllato nell'ambito di un esperimento in laboratorio, in quanto si può chiedere al soggetto di aprire o chiudere gli occhi. Il sistema somatosensoriale e vestibolare, invece, sono più difficili da studiare in quanto non sono controllabili.

1.2 La stabilità posturale

Gli aggiustamenti posturali, volti a controbilanciare gli effetti del movimento sull'equilibrio, vengono compiuti tramite due tipi di meccanismi:

- 1) anticipatori (*feed-forward*): in base alle previsioni dei disturbi che si verificheranno in seguito al movimento, producono risposte programmate assicurando così il mantenimento della stabilità. Le risposte anticipatorie possono essere modificate grazie all'esperienza e la loro efficacia incrementa con l'esercizio;
- 2) compensatori (*feed-back*): sono evocati da stimoli sensoriali a seguito dello sbilanciamento. Si tratta di aggiustamenti estremamente rapidi che hanno intensità adeguata allo scopo di recuperare l'equilibrio e stabilizzare la postura [9, 10].

La stabilità posturale è l'abilità di controllare il centro di massa (COM, *center of mass*) in relazione alla base di supporto. Il COM è definito come un punto che rappresenta idealmente tutta la massa corporea, ed è la variabile principale regolata dal sistema di controllo posturale. Infatti, nel recupero dell'equilibrio a seguito di una perturbazione, il corpo tende a ristabilire la posizione del COM nel range assunto in precedenza allo stimolo. Dunque, per assicurare la stabilità, il sistema nervoso genera forze per bilanciare lo spostamento del COM.

Il centro di pressione (COP, *center of pressure*) è il punto di applicazione della forza totale applicata alla superficie di appoggio ed è indirettamente legato al COM. Infatti, il sistema nervoso centrale modifica la posizione del COM tramite un'azione di controllo che avviene da parte del COP. Se un solo piede è appoggiato sul terreno, il COP si trova in un punto all'interno del piede stesso, se invece entrambi i piedi sono appoggiati al suolo, la posizione del COP varia in un punto compreso fra i due piedi (spostato verso destra o sinistra in relazione alla distribuzione dei pesi).

Le oscillazioni del COP (*sway path*), rilevabili da una pedana di forza (vedi sottocapitolo 2.1), sono racchiuse all'interno di un'area (*sway area*) che può essere determinata con più metodi. Lo spostamento reale del COP, in riferimento all'appoggio plantare, è rappresentato dallo statokinesigramma (detto anche "gomitolo posturale") che lega i parametri di superficie e di lunghezza (Figura 1 e Figura 2). Infine, l'evoluzione delle componenti antero-posteriore (AP) e medio-laterale (ML) del COP sulla base di appoggio in funzione del tempo, è rappresentato dallo stabilogramma (Figura 3).

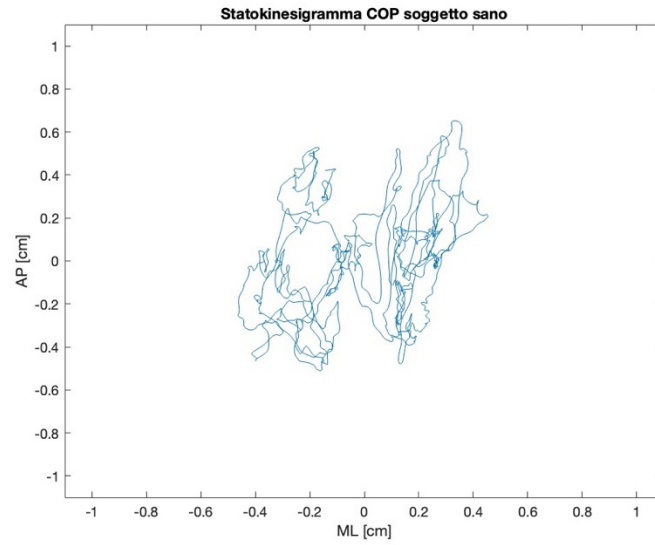


Figura 1: Statokinesigramma di un soggetto sano registrato in 50 secondi di prova statica.

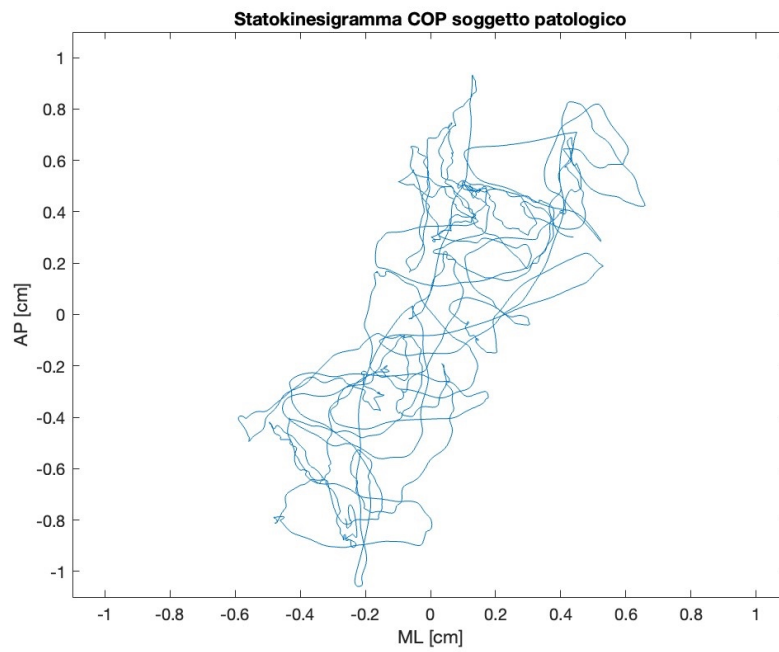


Figura 2: Statokinesigramma di un soggetto patologico registrato in 50 secondi di prova statica.

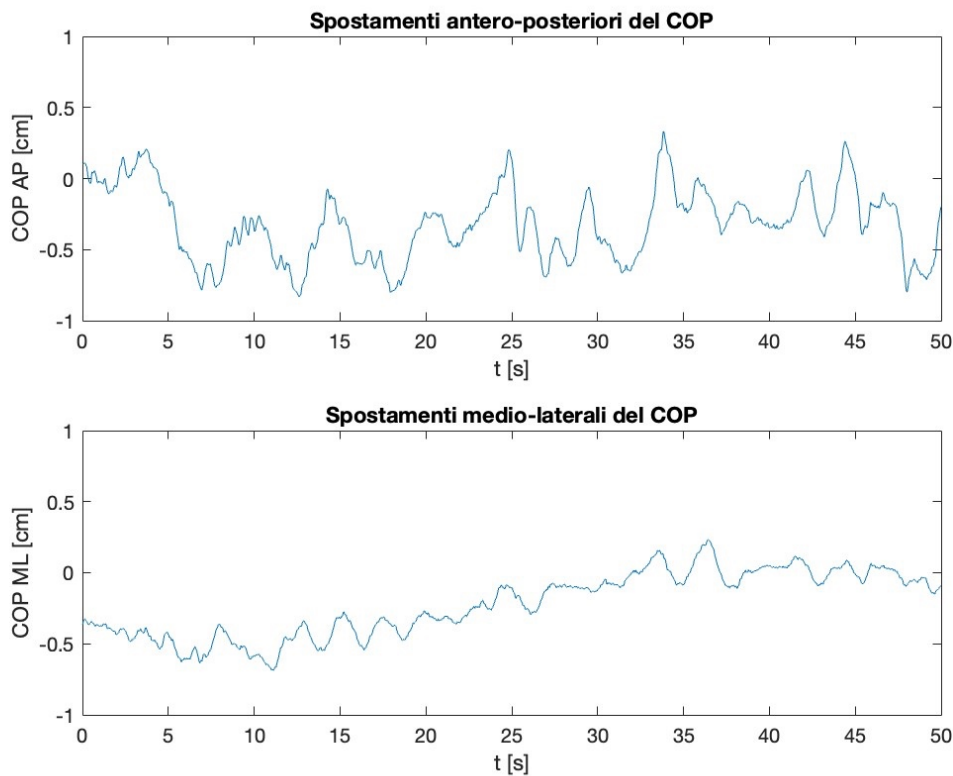


Figura 3: Stabilogramma di un soggetto sano.

1.3 Il controllo posturale

Il controllo posturale è l'abilità di mantenere l'equilibrio in presenza di un campo gravitazionale, mantenendo o riportando la proiezione del COM all'interno della base d'appoggio. La stabilità che si ha quando la base di supporto non cambia nel tempo e non agiscono forze esterne (ad eccezione della forza di gravità), è chiamata "equilibrio statico" [11]. Tuttavia, questo termine può risultare ingannevole in quanto anche in una postura statica il corpo oscilla; è il caso che si verifica durante lo stare seduti e/o lo stare in piedi in quiete. L'oscillazione spontanea è dovuta a diversi fattori (la respirazione, l'attività cardiaca, l'interazione con l'ambiente, ecc.), che provocano micro-spostamenti del COM. Conseguentemente, con l'aumento o la diminuzione dell'attività dei muscoli plantarflexori e dorsiflessori, è possibile far oscillare il COP per contrastare lo spostamento e per mantenere l'equilibrio [12].

Nell'equilibrio statico ci sono diversi fattori che contribuiscono alla postura:

- l'allineamento del corpo che minimizza l'effetto della forza gravitazionale;
- il tono muscolare che evita il collasso del corpo a seguito dell'attrazione gravitazionale;
- gli ingressi sensoriali provenienti da diversi sistemi (ad esempio, le lesioni alla radice dorsale del midollo spinale possono ridurre il tono posturale e l'attivazione di ingressi cutanei sulle piante dei piedi causano una reazione di posizionamento (*placing reaction*) con la conseguente estensione del piede verso la superficie di supporto, aumentando il tono muscolare nei muscoli estensori);
- gli ingressi somatosensoriali, provenienti dal collo, attivati da un cambio di orientamento della testa, possono influenzare soprattutto i muscoli del torace e degli arti (molti sono tonicamente attivi nella posizione eretta).

Il controllo posturale nell'equilibrio statico risulta quindi alquanto dinamico. Questo implica una continua elaborazione sensoriale, con la costante mappatura della percezione per l'azione (*mapping of perception to action*), così che il sistema posturale sia in grado di calcolare dov'è il corpo nello spazio e può predire dove andrà e che azioni saranno necessarie per controllarne il movimento.

Quando, invece, agiscono sul corpo perturbazioni interne ed esterne, si parla di equilibrio dinamico. Questo è definito come la capacità di mantenerne i segmenti corporei in una condizione di stabilità quando sono soggetti a movimenti per compiere determinate azioni e spostamenti. A seconda del tipo e dell'intensità del disturbo, dei gradi di libertà del corpo e dell'eterogeneità antropometrica nell'individuo, si generano un numero elevato di strategie per il mantenimento dell'equilibrio [13].

In questo studio ci limitiamo all'analisi della postura statica nella quale, solitamente, si concentra maggiormente l'interesse scientifico, poiché si lavora alla ricerca di segni che abbiano una valenza clinica e che consentano di leggere al meglio le alterazioni della normalità. Si parte dal concetto che in ogni analisi, la postura eretta è il frutto di un processo di stabilizzazione continua attuato da un sistema che dal punto di vista biomeccanico è estremamente instabile.

1.4 Le strategie del controllo posturale

Nello studio della postura statica, il corpo umano può essere modellato come un pendolo inverso. Si assume una cerniera a livello della caviglia e il corpo si modella come un'asta rigida [14]. L'equilibrio è mantenuto grazie a piccole oscillazioni continue che hanno lo scopo di controbilanciare le forze che tendono a far cadere il corpo. L'equilibrio viene ottenuto solo quando i due vettori, quello applicato al centro di massa, dovuto alla gravità e quello applicato al centro di pressione, causato dalla reazione vincolare, si trovano allineati sull'asse della verticale del soggetto.

Con questa modellizzazione sono ipotizzate due strategie meccaniche per descrivere la dinamica posturale: la strategia di caviglia (*ankle strategy*) e la strategia dell'anca (*hip strategy*) [15].

Nella strategia di caviglia si considera il corpo come rigido ed indeformabile. Quando il centro di gravità (il punto di applicazione della risultante delle forze agenti sul corpo, COG) oltrepassa la verticale del centro di pressione, per recuperare uno stato di equilibrio è necessario che il COP vada oltre la verticale del COM in modo da formare una coppia di richiamo (Figura 4). Questa coppia di richiamo è creata dall'azione dei muscoli della regione posteriore della gamba e dai muscoli plantarflexori del piede. La strategia permette di compensare moderate perturbazioni dell'equilibrio e richiede poco sforzo muscolare, è la più utilizzata dal corpo per poter contrastare l'effetto delle oscillazioni che lo destabilizzano lungo la direzione antero-posteriore.

Introducendo il modello del pendolo inverso (Figura 5), è possibile osservare le oscillazioni del corpo ed analizzare la differenza tra COG (la posizione del vettore verticale dal COM mentre interseca il piano orizzontale), e il COP [16, 17]:

W è la forza peso ($W = mg$);

R è la forza di reazione vincolare ($R = GRF$);

ω è la velocità angolare;

α è l'accelerazione angolare;

p è la distanza caviglia-COP;

g è la distanza caviglia-COG.

Nel primo istante di tempo (1) il COG del corpo si trova avanti rispetto al COP, con velocità angolare in senso orario e forza peso uguale ed opposta alla forza di reazione vincolare. Queste forze parallele agiscono alla distanza g e p rispettivamente dall'articolazione della caviglia. Assumendo il corpo come un pendolo inverso, il cui fulcro è la caviglia, si ha un momento antiorario generato da Rp e un momento orario generato da Wg , da cui:

$$Rp - Wg = I\alpha$$

dove I è il momento di inerzia totale del corpo rispetto il fulcro.

Poiché $g > p$, allora $Wg > Rp$: il corpo è sottoposto ad un'accelerazione angolare in senso orario. Per correggere questa oscillazione in avanti, il soggetto dovrà aumentare l'attivazione dei muscoli flessori plantari in modo da portare il COP davanti al COG (2). In questo caso $Rp > Wg$ e quindi l'accelerazione angolare, cambiando di segno, inizia a diminuire la velocità angolare. Al terzo istante di tempo (3), α provoca un'inversione della ω : ora sia α che ω sono negative ed in senso antiorario, si ottiene un'oscillazione del corpo all'indietro. Il sistema nervoso centrale avverte lo spostamento all'indietro del COG e per correggerlo diminuisce l'attività dei muscoli plantarflessori riducendo il COP fino a farlo spostare posteriormente rispetto al COG. Al quarto istante di tempo (4), α si inverte per tornare di nuovo in senso orario. Dopo un periodo di tempo, ω diminuisce nuovamente e cambia di segno: il corpo torna nella condizione iniziale (5).

Dalla sequenza appena mostrata, è evidente come i muscoli plantarflessori e dorsiflessori, controllando il momento alla caviglia, inducano il COP a muoversi indietro ed avanti così da regolare l'oscillazione del COG.

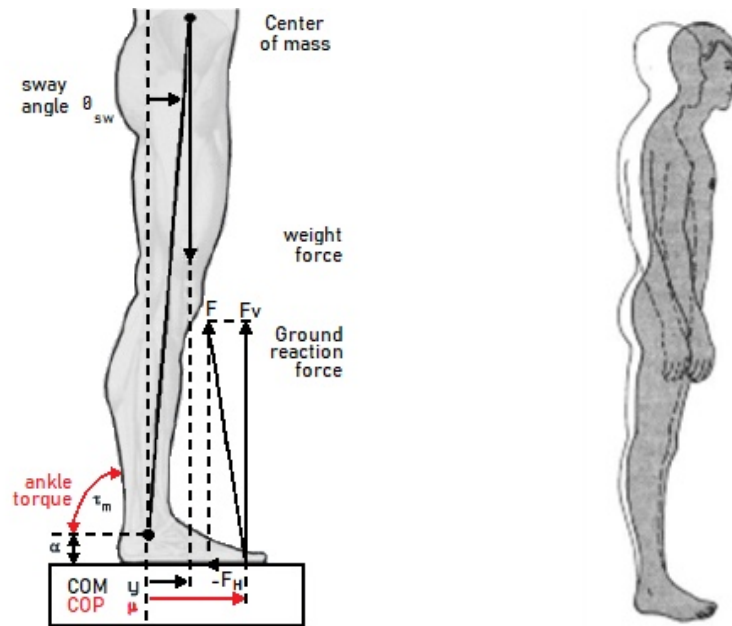


Figura 4: Strategia di controllo della caviglia. Schema delle forze e rappresentazione [18].

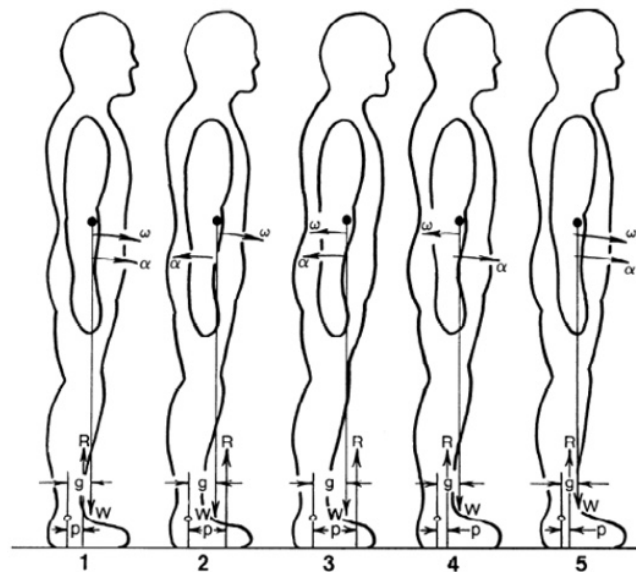


Figura 5: Soggetto in posizione di riposo con i piedi uno di fianco all'altro su una piattaforma di forza in cinque istanti di tempo differenti: rappresentazione dei momenti e delle forze. [17].

Nella strategia d'anca, il corpo umano può essere modellato come un pendolo a più cerniere e formato da più segmenti. Si controlla lo spostamento del COM producendo ampi e rapidi movimenti al livello dell'articolazione d'anca. Il solo modo per il corpo, per allineare il COM con il COP, è quello di modificare la sua geometria [19]. Il risultato (Figura 6) viene ottenuto muovendo le anche e in parte altri segmenti corporei, come ad esempio le braccia. La posizione

della caviglia si mantiene pressoché invariata consentendo solo lievi aggiustamenti in modo che la nuova posizione del baricentro risulti quanto più allineata al centro di pressione. Ciò comporta un dispendio energetico elevato in quanto, in queste condizioni, la percezione del disequilibrio deve essere rapidissima, nell'ordine dei decimi di secondo, con la messa in gioco di accelerazioni elevate [20]. Nelle situazioni comuni questa strategia è impiegata solo nei casi in cui si ha una perturbazione improvvisa della postura e si vuole recuperare in tempi brevi un normale assetto posturale.

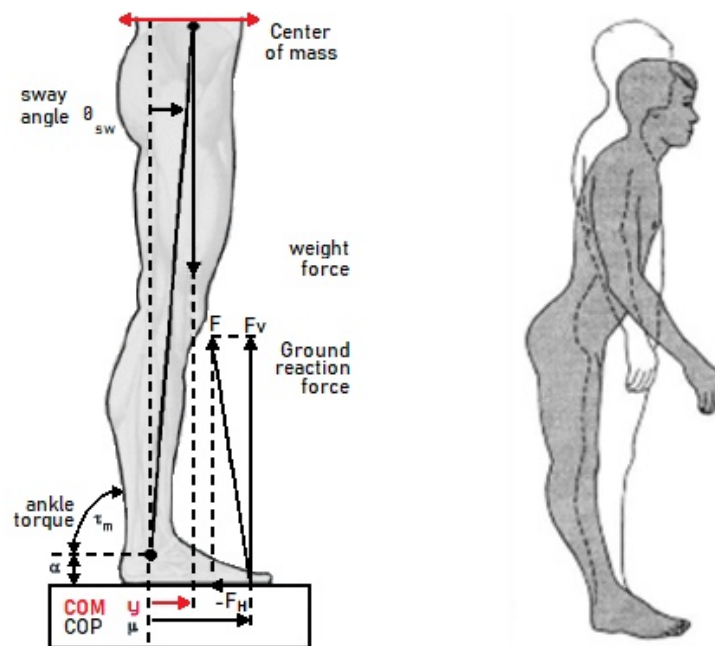


Figura 6: Strategia di controllo dell'anca. Schema delle forze e rappresentazione [18].

Entrambe le strategie sono sempre presenti per il mantenimento dell'equilibrio, ma una può predominare sull'altra. La decisione è presa dal sistema nervoso centrale sulla base di vari fattori che includono: le caratteristiche della perturbazione (ad esempio direzione ed entità) e le limitazioni di carattere biomeccanico (ad esempio l'uso della strategia di caviglia richiede un intatto range di movimento e forza nelle caviglie). In generale, la strategia di caviglia predomina alle basse frequenze di oscillazioni (< 1 Hz) e quando la superficie di supporto è stabile, mentre la strategia d'anca predomina alle alte frequenze (> 1 Hz) o quando la superficie di supporto è cedevole o più piccola dei piedi (ad esempio, se si sta su una trave). Questi meccanismi sono usati sia nel controllo a *feed-back* che in quello *feed-forward*, per mantenere l'equilibrio.

2. MATERIALI E METODI

Durante una prova statica, il COP si muove all'interno della base di appoggio ed è rappresentato dalla traiettoria nelle componenti antero-posteriore e medio-laterale. L'analisi delle oscillazioni corporee permette di valutare la capacità dell'individuo di mantenere la posizione eretta ed ha numerose applicazioni pratiche in diversi ambiti della medicina.

2.1 La piattaforma di forza

La piattaforma di forza è un sistema di rilevamento meccanico in grado di misurare la forza esercitata nella zona di contatto piede-suolo (pressione del piede e forze di reazione al terreno), i momenti coinvolti nei movimenti umani e la posizione del COP. La pedana misura in particolare la reazione alla forza applicata sulla base con le sollecitazioni percepite dai sensori posti sui quattro angoli. È uno strumento che produce in uscita un segnale proporzionale alla forza agente, attraverso celle di carico con tecnologia piezoelettrica. Quando la forza viene impressa sulla superficie della piattaforma, i sensori si deformano provocando così variazioni di tensione misurabili, che sono proporzionali alla forza applicata che ha causato la deformazione stessa.

Durante una prova di postura statica il soggetto rimane fermo in stazione eretta sopra la pedana dinamometrica cercando di non compiere alcun movimento. Per tutto il tempo dell'analisi tramite la piattaforma, opportunamente calibrata, sono registrate le forze scambiate tra la pedana stessa e i piedi, le quali verranno utilizzate nel calcolo della posizione del COP, per ogni istante della prova.

Per questo studio è stato utilizzato il dataset creato da Damiana A. Santos e Marcos Duarte, pubblicato nell'articolo scientifico: "A public data set of human balance evaluations" [21], per analizzare la postura in soggetti differenti e con diversi set-up sperimentali. Si tratta di dati acquisiti utilizzando una piattaforma di forza commerciale da 40 cm × 60 cm (OPT400600-1000; AMTI, Watertown, MA, USA) (Figura 7 e Figura 8) con una frequenza di campionamento di 100 Hz. L'acquisizione dei dati è stata eseguita utilizzando il software *NetForce* (versione 3.5.3; AMTI, Watertown, MA, USA). Il software restituisce le forze e i momenti di forza (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z) dalla piattaforma in un file con un formato binario

proprietario. I dati misurati dalla pedana sono stati ripuliti delle componenti di rumore con un filtro Butterworth passa-basso a zero lag di 10 Hz di 4° ordine [22]. Il centro di pressione nella direzione antero-posteriore e medio-laterale è stato calcolato in accordo con le formule standard descritte nel manuale della piattaforma:

$$COP_x = -\frac{M_y}{F_z}$$

$$COP_y = +\frac{M_x}{F_z}$$

La direzione positiva dell'asse x, secondo il sistema di riferimento scelto, è quella anteriore, mentre, la direzione positiva dell'asse y è verso destra (Figura 10).

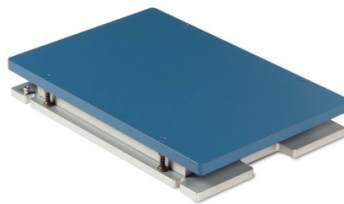


Figura 7: Piattaforma di forza.

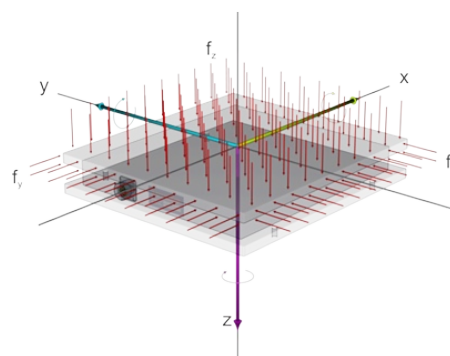


Figura 8: Schema di funzionamento e sistema di riferimento della piattaforma di forza.

2.2 I soggetti e le prove

Il dataset scelto è composto da dati acquisiti su 163 soggetti (116 femmine e 47 maschi), con età variabile compresa tra 18 e 85 anni, massa del corpo compresa tra 44.0 e 75.9 kg, altezza compresa tra 140.0 e 189.8 cm e indice di massa corporea (BMI, *body-mass index*) compreso tra 17.2 e 31.9 kg/m². Nella totalità dei soggetti, 16 presentano deficit o patologie di vario genere. Tutte le informazioni relative alle prove sono disponibili in file pubblici.

Per il seguente studio, dal dataset complessivo è stata fatta una selezione al fine di analizzare i parametri su alcuni soggetti per poi riportare caratterizzazioni generali sull'intera popolazione. Sono stati selezionati 16 soggetti (8 sani e 8 patologici) con età variabile compresa tra 23 e 80 anni. Nelle due popolazioni sono stati scelti soggetti con età confrontabile (Tabella 1). La scelta dei soggetti patologici è stata fatta considerando varie tipologie di deficit che possano avere effetti sul mantenimento della postura, inoltre, sono stati esclusi dalla selezione tutti i soggetti che presentavano mancanza di prove. I soggetti sani sono stati scelti in base all'età dei soggetti patologici precedentemente raccolti.

| SANI | | PATOLOGICI | | |
|------------|-------|------------|-------|----------------|
| Età (anni) | Sesso | Età (anni) | Sesso | Deficit |
| 23 | F | 23 | F | Cerebral Palsy |
| 34 | M | 33 | F | Visual |
| 44 | M | 44 | F | Intellectual |
| 63,5 | M | 63 | F | Hearing |
| 66 | F | 67 | M | Parkinson |
| 69 | M | 68 | F | Visual |
| 71 | F | 72 | M | Hearing Visual |
| 79 | F | 80 | F | Hearing |
| 23 | F | 23 | F | Cerebral Palsy |

Tabella 1

L'acquisizione dei dati è stata fatta per ogni soggetto durante prove di postura statica, di durata 60 secondi ciascuna. Sono state analizzate quattro differenti condizioni (Figura 9): superficie rigida (*firm*) con occhi aperti (OA), superficie rigida (*firm*) con occhi chiusi (OC), superficie compliant (foam) con occhi aperti (OA), superficie compliant (foam) con occhi chiusi (OC).

Nelle prove di posturografia, si utilizza spesso la condizione ad occhi chiusi per valutare l'equilibrio e la stabilità posturale in condizioni di privazione visiva. Senza la vista, il corpo deve fare affidamento maggiormente su altri sensi, il che può rivelare eventuali disfunzioni o scompensi nel sistema di controllo posturale. La superficie instabile compliant, invece, prevede il posizionamento di uno strato alto 6 cm, di gommapiuma, sulla base di appoggio, sopra il quale si effettuano le prove di equilibrio (*foam block* Balance Pad; Airex AG, Sins, Switzerland). La validità dell'utilizzo di uno strato in schiuma posizionato al di sopra della pedana, è già stata appurata in studi di posturografia statica [23, 24] e dinamica [25, 26]. Quando ci si trova al di sopra della superficie di gomma, i contributi relativi agli input somatosensoriali cambiano: si riducono le informazioni derivanti dall'appoggio dei piedi e, di conseguenza, a causa della viscoelasticità del mezzo, viene ridotta la capacità di torsione della caviglia alterando il controllo posturale.

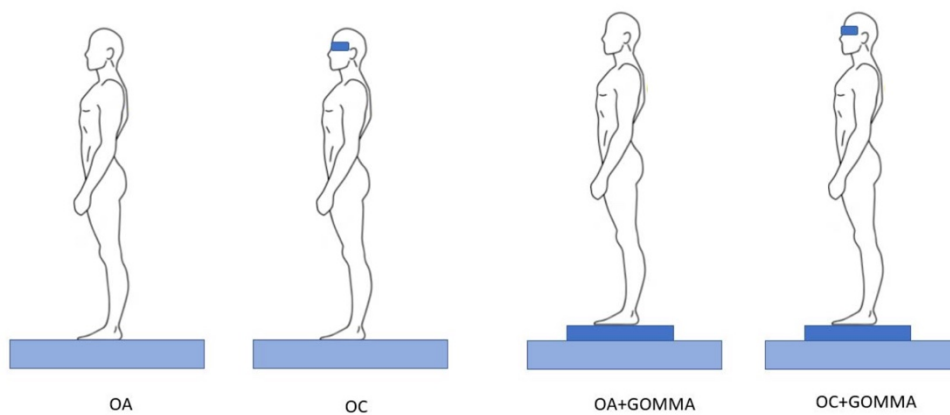


Figura 9: Diverse condizioni delle prove di postura statica analizzate.

Per ogni condizione studiata, sono state registrate tre prove. Dunque, in totale si hanno a disposizione dodici prove relative a ciascun soggetto. In tutte le condizioni, ai soggetti è stato richiesto di stare in piedi il più fermi possibile, con i piedi nudi e le braccia lungo i fianchi. Dovevano guardare un bersaglio nero rotondo di 5 cm posizionato all'altezza degli occhi del soggetto su una parete 3 m più avanti. Per le prove ad occhi chiusi, ai soggetti veniva prima chiesto di guardare il bersaglio con gli occhi aperti, di trovare una postura comoda, e successivamente di chiudere gli occhi. Pochi secondi dopo, poteva iniziare l'acquisizione dei dati. Per tutte le prove, i piedi del soggetto sono stati posizionati con un angolo di 20 gradi tra loro e i talloni sono stati mantenuti a 10 cm di distanza (richiedendo ai soggetti di posizionarsi sulle linee segnate sulla parte superiore della piattaforma di forza (Figura 10)). Le prove sono

state acquisite in una stanza vuota con pareti bianche e illuminazione adeguata. Al termine di ogni prova, il soggetto poteva riposare (sedersi se lo desiderava), per circa un minuto prima della prova successiva. Se il soggetto non fosse stato in grado di completare una prova di 60 secondi, la prova sarebbe stata interrotta immediatamente e ripetuta fino ad un massimo di due volte. Se, dopo il secondo tentativo, la prova non fosse ancora stata completata, sarebbe stata considerata mancante.

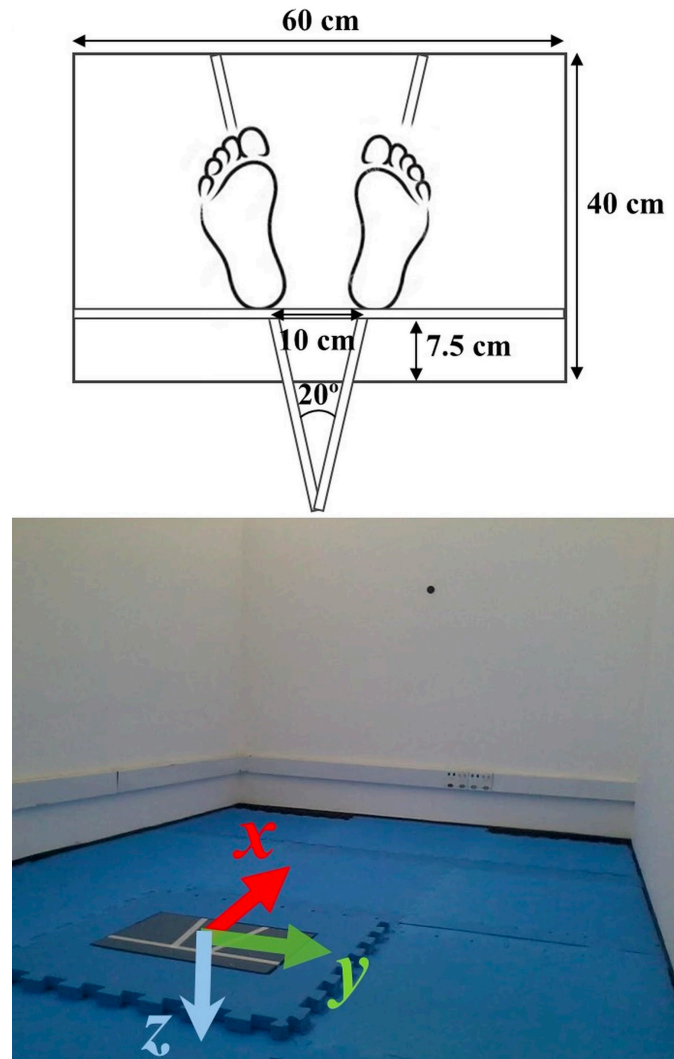


Figura 10: In alto si mostra come si posiziona il soggetto durante la prova, in basso il sistema di riferimento scelto per l'acquisizione dei dati [22].

2.3 Il processamento dei dati

Ogni paziente nel dataset è identificato da un file “BDSxxxxx”² con all’interno i dati generati dalla piattaforma di forza. Inoltre, nel dataset è anche presente un file denominato “BDSinfo” che restituisce le informazioni generiche sui pazienti.

L’ambiente di sviluppo utilizzato per elaborare i dati e per estrarne i parametri necessari per il seguente lavoro di tesi, è MATLAB (software sviluppato dall’azienda *MathWorks, Inc*).

Sono state salvate su MATLAB tutte le prove relative ai soggetti di interesse selezionati, e con diverse funzioni sono state processate. Ad ogni prova sono stati tagliati i 5 secondi iniziali e finali al fine di ridurre le componenti con più alta probabilità di errore o incertezza (dovuta ad una minore stabilità del soggetto a causa di movimento iniziale per assestare la posizione statica, o a causa di movimento per la stanchezza finale). Dunque, ogni analisi presa in considerazione dura 50 secondi e, poiché i dati sono stati acquisiti a 100 Hz, ogni prova è composta da 5000 valori numerici (campioni). Inoltre, ogni test è stato centrato nello zero sottraendone la relativa media, per rendere l’analisi confrontabile tra tutte le prove di ogni soggetto.

Lo studio che viene in seguito proposto sfrutta l’utilizzo delle mappe di calore³ per la caratterizzazione di punti spaziali e temporali.

Le mappe di calore (*heatmap*) si utilizzano per creare delle rappresentazioni grafiche dei dati di interesse su un piano: i valori numerici da analizzare, organizzati in una matrice, sono evidenziati da variazioni di una scala di colori. Lo scopo è quello di visualizzare in un’immagine, quindi su una superficie bidimensionale, come e dove sono distribuiti i dati dello studio. Le mappe si creano aggregando set di variabili (x, y) sistemati in una matrice di partenza (nel nostro caso le variabili da visualizzare sono le due componenti della traiettoria del COP: antero-posteriore e medio-laterale). In seguito, ad ogni punto della mappa si associa un numero (e un colore) corrispondente al numero di volte che ogni coppia (x, y) del set appare insieme

² BDS (*Balance Data Set*), e xxxxx che si riferisce al numero della prova (da 00001 a 01956). Per ogni soggetto ci sono 12 prove e i numeri nei nomi dei file sono raggruppati in set di 12. Ad esempio, il primo soggetto ha i file dal 00001 al 00012 e l’ultimo soggetto (numero 163), ha i file dal 01945 al 01956. In totale mancano 26 file relativi a 5 soggetti che non sono stati in grado di completare alcune prove.

³ Per la creazione funzione *heatmap* su MATLAB.

nella matrice di partenza: è possibile in questo modo visualizzare l'intensità della variazione dei dati scelti per lo studio. In corrispondenza del colore più marcato all'interno della mappa si hanno valori numerici più elevati e, viceversa, in corrispondenza del colore più tenue si hanno valori numerici più bassi. Solitamente per la rappresentazione si sceglie una scala di colori che può ben evidenziare le diversità dei dati in oggetto.

L'idea alla base dell'analisi è quella di rappresentare il COP in un piano per valutare le zone di maggiore incidenza e permanenza della traiettoria durante le prove di postura statica. Sfruttando le mappe di calore si possono trarre delle conclusioni in merito ai punti di maggiore rilevanza e persistenza sia in termini spaziali (analizzando dove sono sistemati i punti di maggiore aggregazione all'interno della mappa che ha dimensioni proporzionali a quelle della piattaforma di forza), sia in termini temporali (analizzando quanti sono i punti di maggiore aggregazione all'interno della mappa che ha dimensioni proporzionali a quelle della piattaforma di forza). Infatti, la rappresentazione del COP sul piano, secondo questa modalità, ci restituisce anche informazioni temporali. L'intensità di colore di ciascuna cella evidenzia il tempo di permanenza del COP in un preciso punto della pedana.

La rappresentazione delle mappe di calore si realizza con la suddivisione del piano in celle: una cella può essere definita come una parte rettangolare dell'area dove si sviluppa spazialmente la serie da esaminare ed è l'unità fondamentale dell'immagine. La matrice che rappresenta la distribuzione nel piano del COP viene quindi divisa e discretizzata in sezioni più piccole, facilitando la lettura e l'interpretazione. Ogni cella ha dimensioni fisse che dipendono dalla risoluzione scelta per graficare i dati. Inoltre, contiene un valore numerico (numero di occorrenze) che rappresenta l'intensità del fenomeno analizzato (nel nostro caso rappresenta la quantità di tempo che il COP trascorre in quella specifica zona).

Per il seguente studio è stata scelta una suddivisione in 400×600 celle, sulla base della dimensione della piattaforma. In questo modo tutte le rappresentazioni, per ogni soggetto e per ogni condizione, sono state standardizzate secondo le dimensioni della pedana di forza, ogni cella della *heatmap* rappresenta 1 mm^2 della piattaforma. I dati acquisiti relativi al COP (sia nella direzione antero-posteriore che medio-laterale), sono stati discretizzati per consentire di localizzare i 5000 valori registrati per ogni prova all'interno di ogni cella. Per l'implementazione con MATLAB, i dati da visualizzare sono stati sistemati in set organizzati all'interno di una tabella. Ad ogni campione è stata associata una cella di riferimento della

pedana che meglio approssimasse, con il minor errore possibile, la posizione di quel valore numerico.⁴ Dunque, considerando i valori nella direzione antero-posteriore e medio-laterale del COP, per tutta la durata della prova, si identifica in ogni istante la cella della *heatmap* che rappresenta il punto in cui si localizza la traiettoria in quello specifico momento. L'immagine finale restituisce per ogni cella un colore, con un valore numerico, che indica per quante volte quella determinata cella è stata associata alla coppia di variabili dei set di partenza durante tutta la prova.

Questa rappresentazione consente di visualizzare le abitudini posturali del soggetto. Se il COP rimane a lungo in determinate aree, suggerisce una stabilità o una condizione ricorrente di quella posizione. Al contrario, un COP che si sposta rapidamente tra diverse celle può indicare instabilità o variazione degli aggiustamenti. In questo modo, ogni cella diventa un indicatore chiave della dinamica del COP, permettendo di comprendere e analizzare il comportamento posturale del soggetto nel tempo.

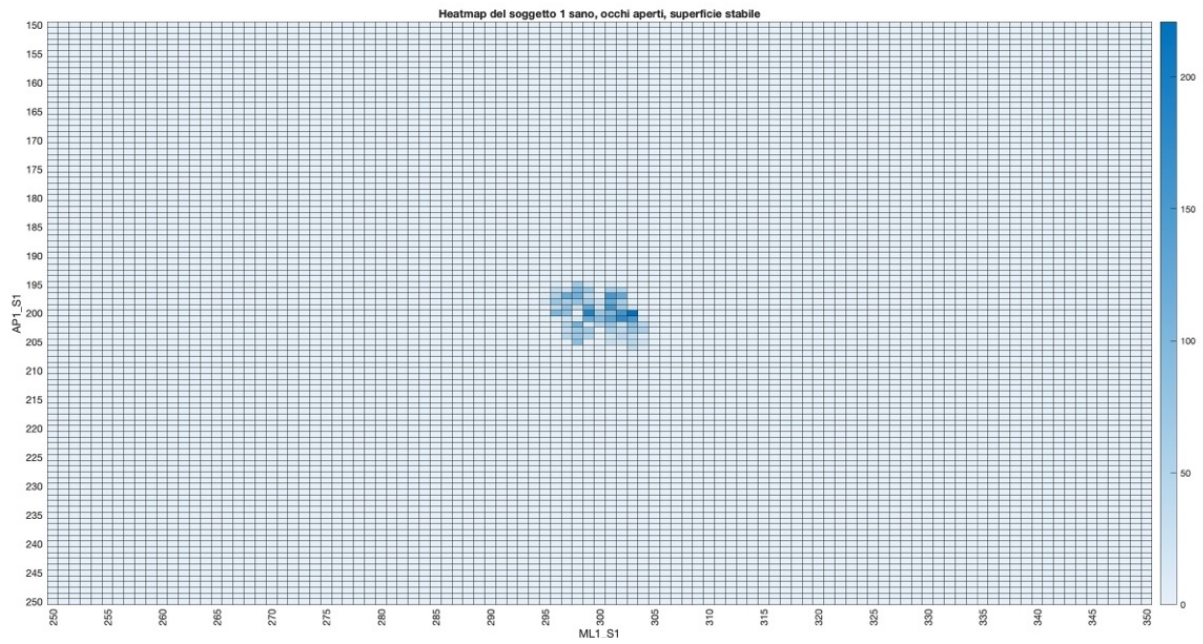
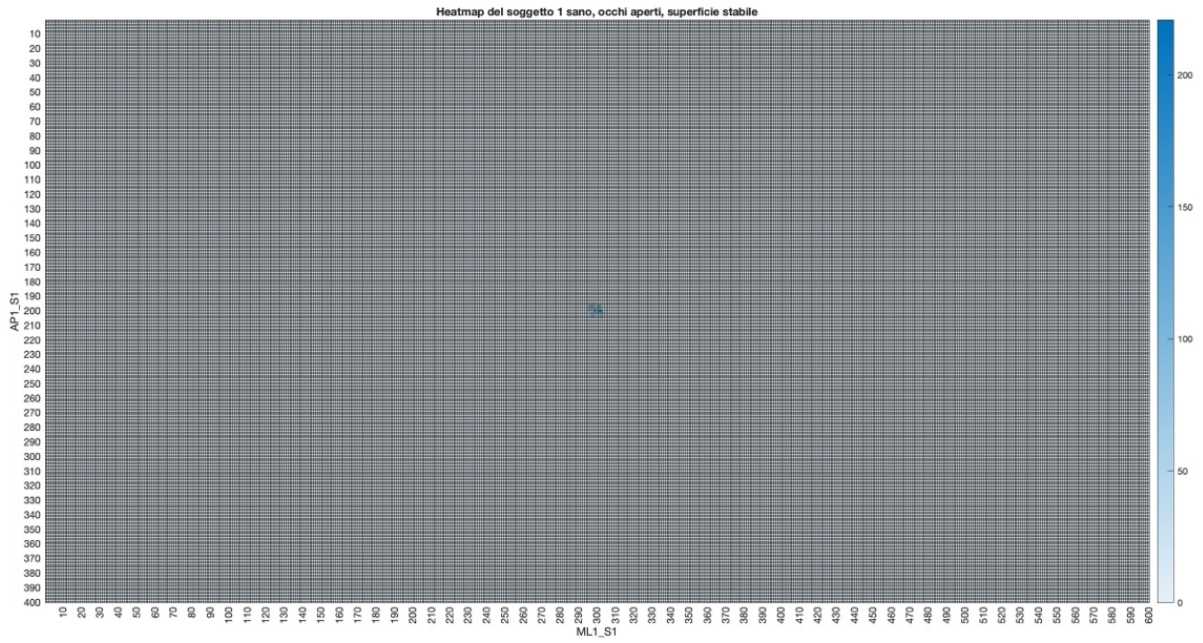
Di seguito si riporta un esempio di una mappa di calore realizzata con i dati acquisiti del COP di un soggetto sano, durante una prova ad occhi aperti e su superficie stabile. Si possono vedere tre immagini che rappresentano la stessa prova ma con ingrandimenti diversi. La prima mostra la *heatmap* del COP nelle dimensioni standard della pedana (400×600 celle, ogni cella 1 mm^2 della piattaforma di forza), le altre due la mostrano effettuando una serie di zoom per meglio identificare l'area di interesse:

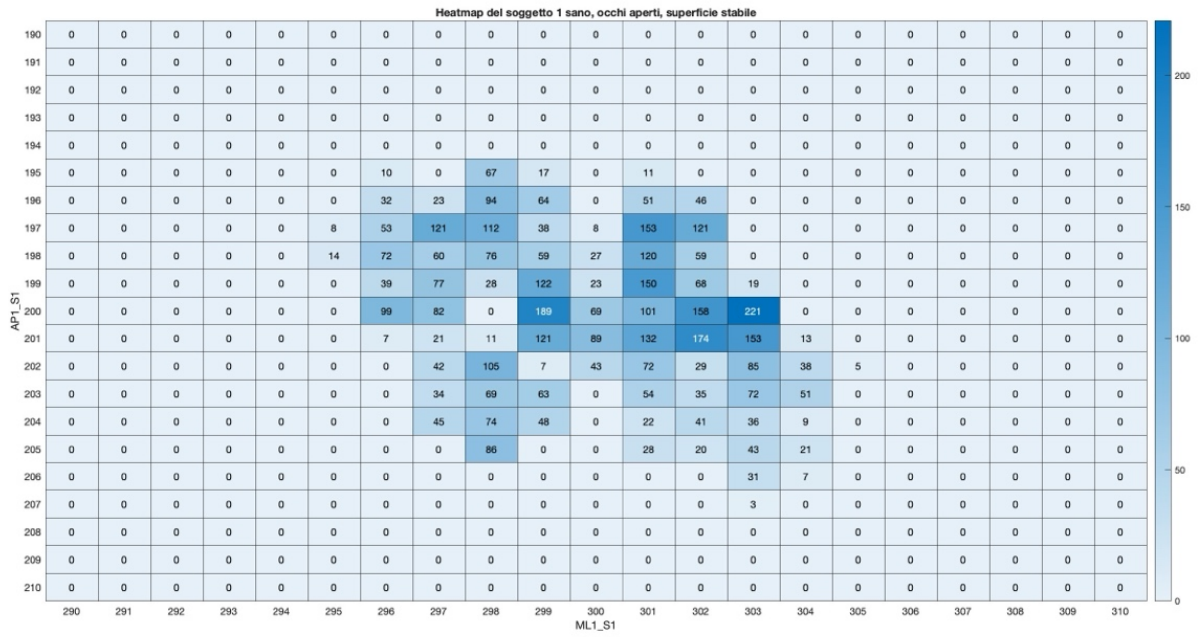
⁴ È stata usata la funzione *discretize* di MATLAB:

$Y = \text{discretize}(X, \text{edges})$ restituisce gli indici delle celle che contengono gli elementi di X .

La j -esima cella contiene l'elemento $X(i)$ se $\text{edges}(j) \leq X(i) < \text{edges}(j+1)$, per $1 \leq j < N$.

N è il numero di celle e $N+1$ è la lunghezza di *edges*. L'ultima cella contiene entrambi gli *edges* in modo tale che $\text{edges}(N) \leq X(i) \leq \text{edges}(N+1)$.





3. RISULTATI

Da una prima osservazione delle mappe di calore sono subito emerse delle differenze rilevanti che sono state prese in considerazione per lo studio:

- numero e posizione delle celle con intensità di colore maggiore;
- dispersione delle celle (variabilità nel range di celle occupate).

Di seguito si riportano degli esempi di *heatmap* realizzate per un soggetto sano e per un soggetto patologico al fine di mostrare le differenze principali che emergono da una prima analisi visiva e qualitativa.

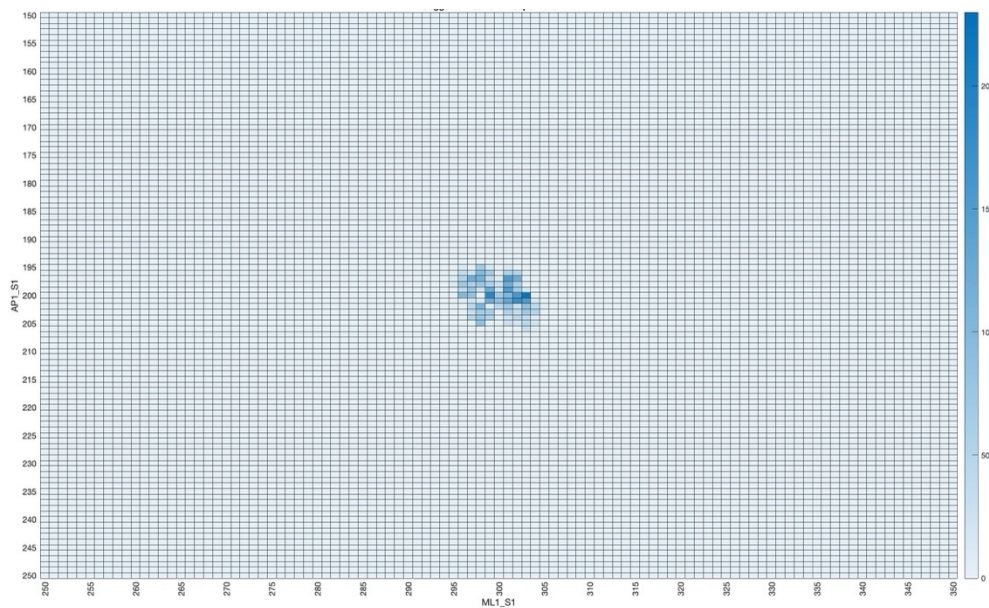


Figura 11: Rappresentazione del COP della prova 1 del soggetto 1 sano, con occhi aperti, su superficie stabile

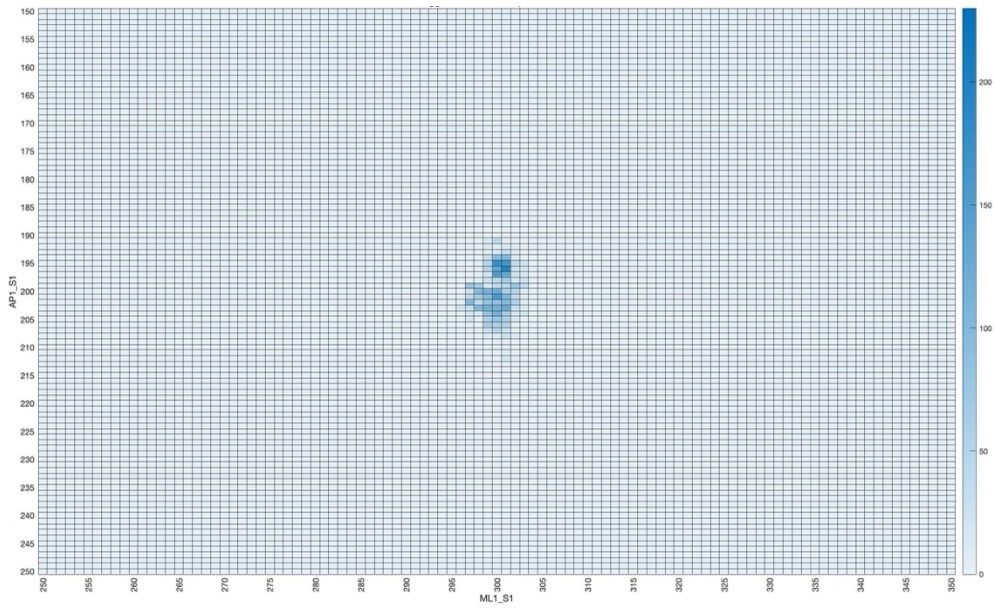


Figura 12: Rappresentazione del COP della prova 1 del soggetto 1 sano, con occhi chiusi, su superficie stabile

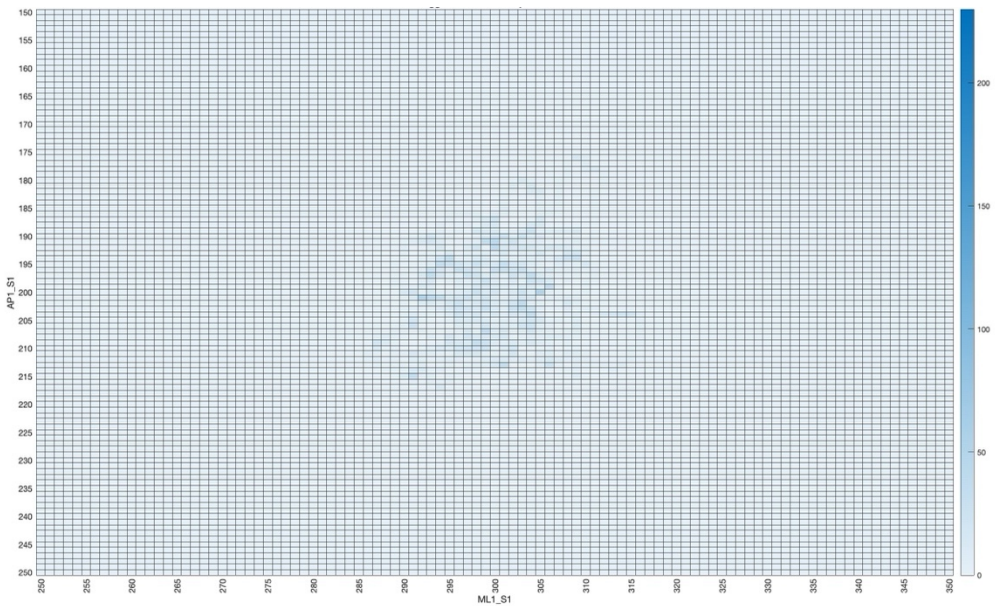


Figura 13: Rappresentazione del COP della prova 1 del soggetto 1 sano, con occhi aperti, su superficie instabile

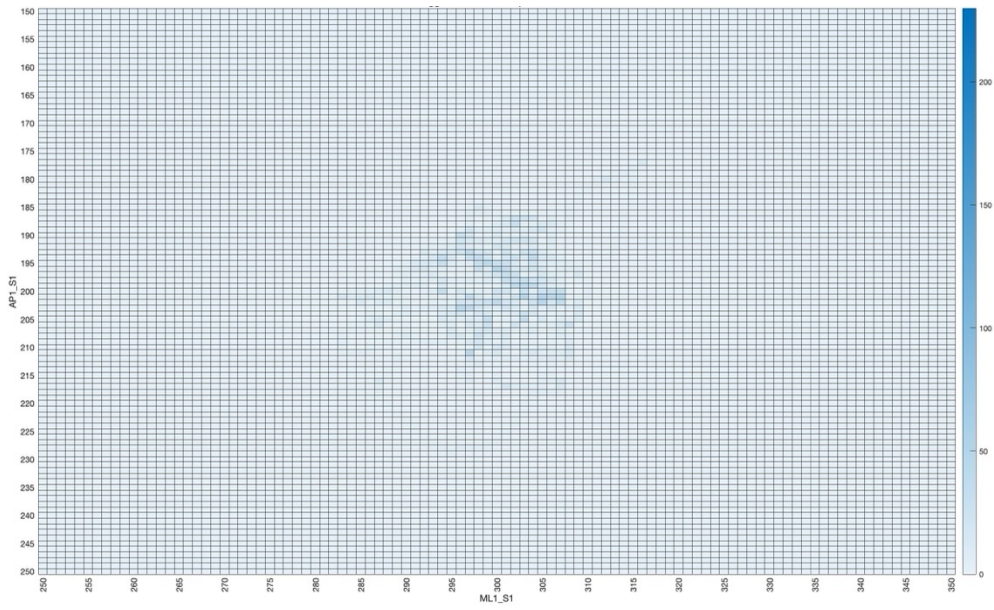


Figura 14: Rappresentazione del COP della prova 1 del soggetto 1 sano, con occhi chiusi, su superficie instabile

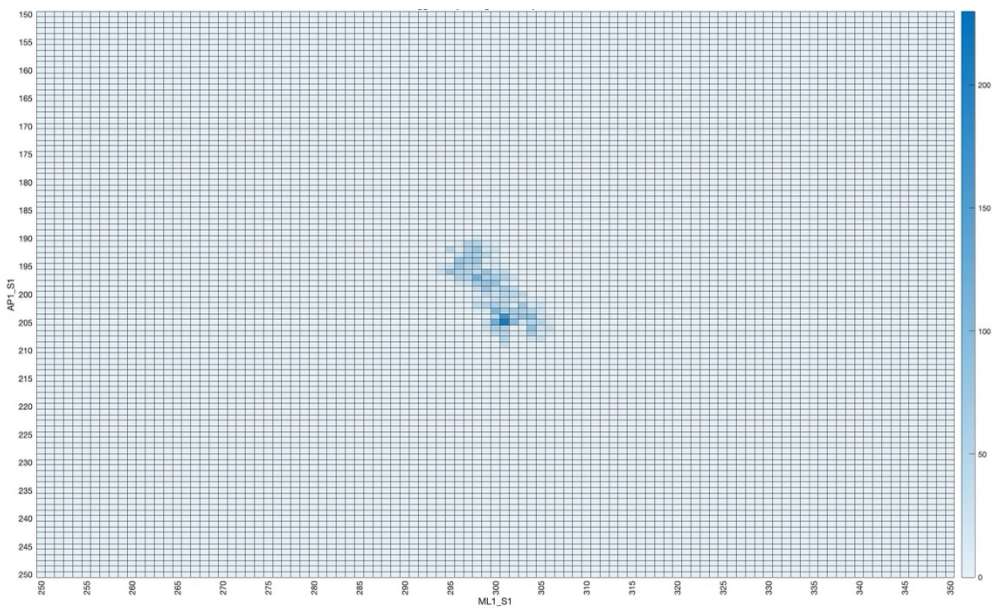


Figura 15: Rappresentazione del COP della prova 1 del soggetto 1 patologico, con occhi aperti, su superficie stabile

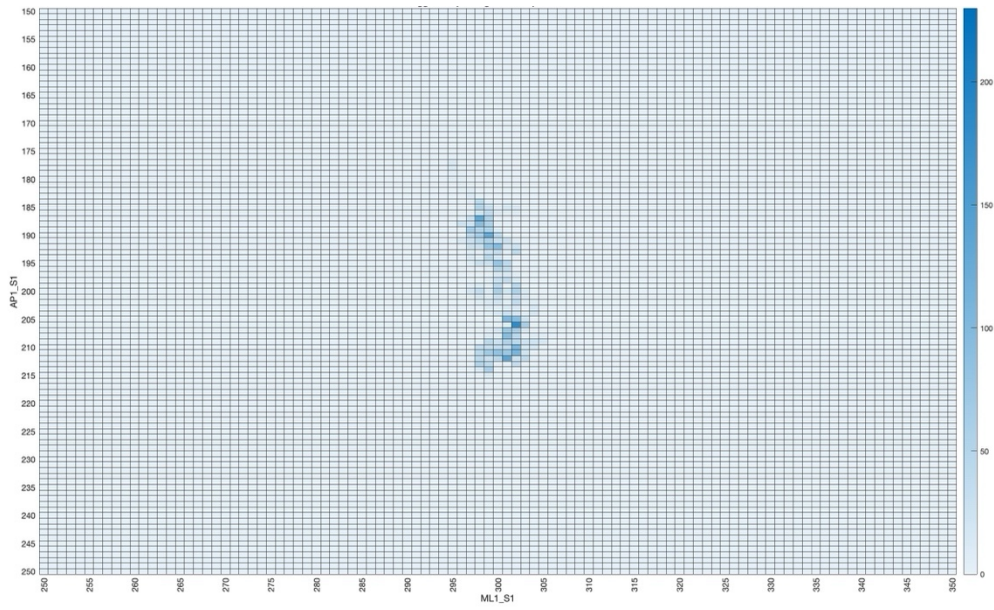


Figura 16: Rappresentazione del COP della prova 1 del soggetto 1 patologico, con occhi chiusi, su superficie stabile

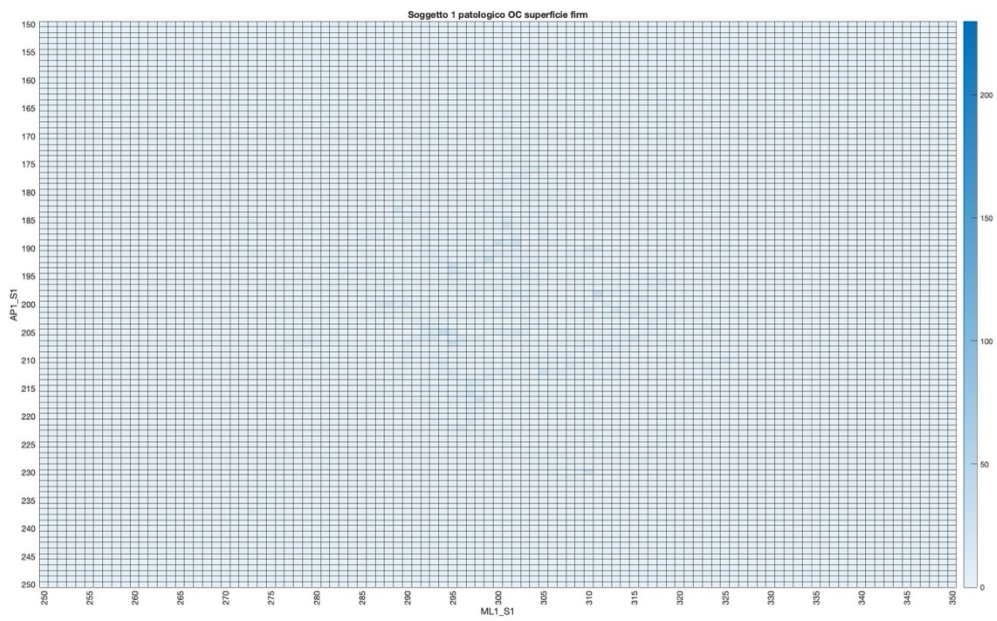


Figura 17: Rappresentazione del COP della prova 1 del soggetto 1 patologico, con occhi aperti, su superficie instabile

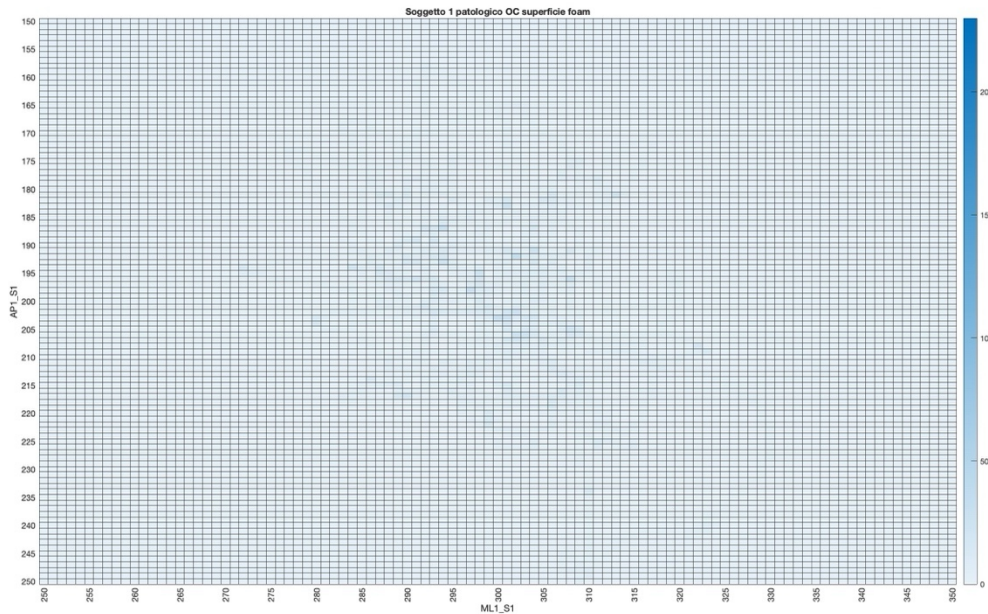


Figura 18: Rappresentazione del COP della prova 1 del soggetto 1 patologico, con occhi chiusi, su superficie instabile

Per rendere l'analisi generalizzata sono stati definiti parametri in grado di quantificare l'informazione portata dalla rappresentazione, che potessero caratterizzare le differenze, sia tra le due popolazioni prese in esame (sani e patologici), sia all'interno della popolazione stessa al variare della condizione (occhi aperti e occhi chiusi) e della superficie di appoggio (stabile o instabile). L'implementazione è stata fatta considerando, per ogni popolazione, tutte le prove relative a ciascun soggetto. Dunque, avendo selezionato 8 soggetti con tre prove ciascuno, per ogni modalità scelta, si analizzano complessivamente 24 acquisizioni di dati per ogni individuo, ad ogni condizione e superficie di appoggio.

I parametri calcolati e valutati sono i seguenti:

- 1) numero medio delle celle con occorrenze maggiori di specifiche soglie scelte;
- 2) range medio delle celle occupate con occorrenze maggiori di zero (dispersione delle celle);
- 3) valore numerico medio associato a tutte le celle con occorrenze maggiori di specifiche soglie scelte;
- 4) posizione e numero delle celle con occorrenze maggiori di specifiche soglie scelte: in quale quadrante della piattaforma di forza si trovano e quante sono numericamente in quel dato quadrante.

Analizzando le *heatmap* sono state definite diverse soglie per selezionare le celle, al fine di poter confrontare i risultati. Ogni soglia impone il numero minimo di occorrenze che una determinata cella deve avere per rispettare la condizione di selezione. È un indice che, associato ad una cella, denota il tempo minimo che la traiettoria del COP persiste in uno specifico mm^2 della piattaforma di forza. Le soglie scelte per lo studio sono le seguenti:

- numero di occorrenze maggiore di 20 (celle in cui il COP persiste più di 0,2 secondi);
- numero di occorrenze maggiore di 40 (celle in cui il COP persiste più di 0,4 secondi);
- numero di occorrenze maggiore di 60 (celle in cui il COP persiste più di 0,6 secondi);
- numero di occorrenze maggiore di 80 (celle in cui il COP persiste più di 0,8 secondi);
- numero di occorrenze maggiore di 100 (celle in cui il COP persiste più di 1 secondo);

3.1 Analisi del numero medio di celle con occorrenze maggiori di specifiche soglie

Andando a valutare il numero medio delle celle con occorrenze maggiori delle specifiche soglie imposte, lo studio che ne deriva è relativo al tempo di persistenza del COP. Un numero medio elevato sottolinea un gran numero di celle (e quindi di punti della pedana) in cui la traiettoria del centro di pressione persiste più a lungo e non varia rapidamente nel tempo. In particolare, all'aumentare della soglia, un numero medio più alto acquista notevole importanza, evidenziando pochissime variazioni del COP. Ad esempio, un valore medio elevato di celle con soglia di occorrenze minime pari a 100, dimostra che in molti punti la traiettoria rimane per almeno un secondo in 1 mm^2 della base di appoggio.

Ciò che ci si aspetta è quindi un numero medio di aree ad alta densità maggiore per soggetti sani e, all'interno della popolazione, maggiore per prove ad occhi aperti e su superficie stabile. Infatti, in questi casi (per quanto spiegato in precedenza), il corpo ha bisogno di fare meno aggiustamenti per mantenersi in equilibrio e si ha un maggior controllo posturale.

Si riportano in seguito dei grafici che rappresentano i risultati calcolati con MATLAB per le due popolazioni e per le diverse condizioni.

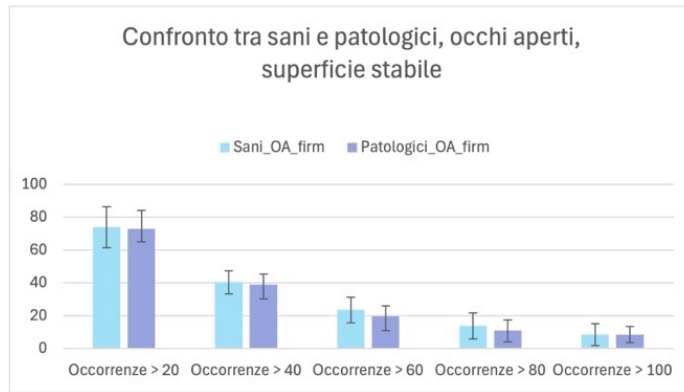


Figura 19: Popolazioni di sani e patologici a confronto, considerando dati registrati durante prove ad occhi aperti e su superficie stabile.

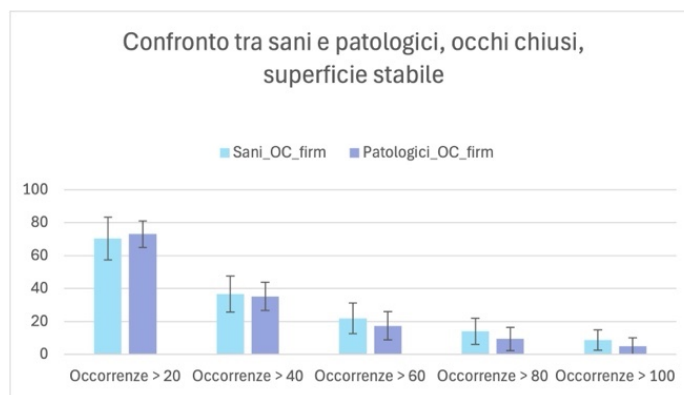


Figura 20: Popolazioni di sani e patologici a confronto, considerando dati registrati durante prove ad occhi chiusi e su superficie stabile.

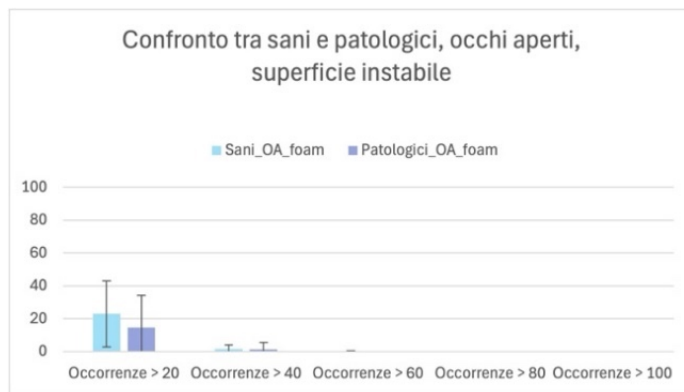


Figura 21: Popolazioni di sani e patologici a confronto, considerando dati registrati durante prove ad occhi aperti e su superficie instabile.

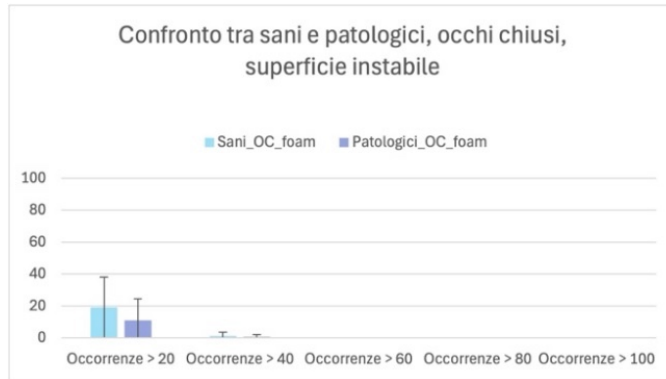


Figura 22: Popolazioni di sani e patologici a confronto, considerando dati registrati durante prove ad occhi chiusi e su superficie instabile.

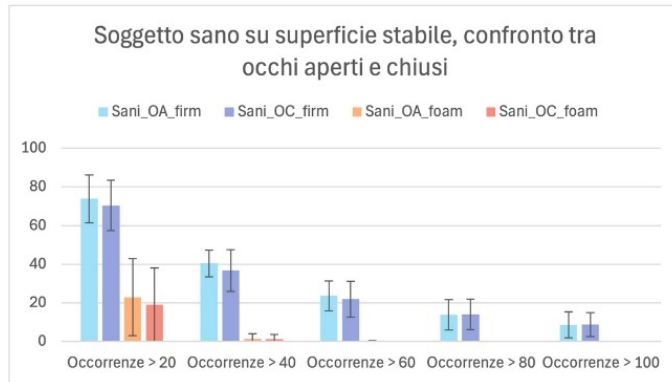


Figura 23: Confronto delle diverse condizioni delle prove di postura statica analizzate per la popolazione dei soggetti sani.

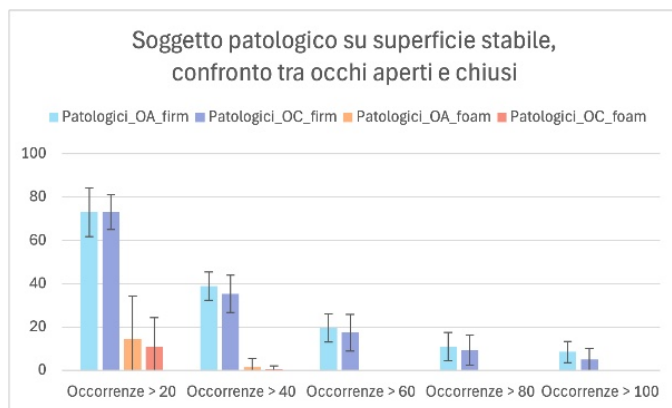


Figura 24 Confronto delle diverse condizioni delle prove di postura statica analizzate per la popolazione dei soggetti patologici.

Come è evidente dai grafici, in linea con quanto già ipotizzato, si può concludere che:

- a prescindere dalla popolazione, dalla condizione scelta e dalla superficie di appoggio, all'aumentare del numero di occorrenze selezionato, diminuisce il numero medio di celle (Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22, Figura 23 e Figura 24);
- il valore medio per la popolazione dei sani è circa uguale o poco maggiore rispetto a quello per la popolazione dei patologici (Figura 19 e Figura 20). La differenza aumenta se si considerano le prove su superficie instabile rispetto a quella stabile (Figura 21 e Figura 22);
- a parità di popolazione, il numero medio di occorrenze è di poco maggiore per le prove ad occhi aperti rispetto alle prove ad occhi chiusi (Figura 23 e Figura 24);
- a parità di popolazione, il numero medio di occorrenze è notevolmente maggiore per le prove sulla superficie stabile rispetto alle prove su superficie instabile (Figura 23 e Figura 24).

3.2 Analisi del range medio di celle occupate con occorrenze maggiori di zero

In seguito, è stato analizzato il range medio delle celle occupate dalla traiettoria del COP durante ogni prova. Il range è stato valutato considerando, sia per la componente antero-posteriore che medio laterale, quante celle hanno valore numerico maggiore di zero, caratterizzando la dispersione e la variabilità del COP. Infatti, maggiore è il range medio delle celle occupate dal COP, maggiore ampiezza ed estensione ha la traiettoria nel piano, viceversa, minore è il range medio delle celle occupate dal COP, maggiore compattezza ha la traiettoria nel piano che risulta con un gomito posturale più racchiuso.

Ciò che ci si aspetta, in base alle considerazioni fatte, è un range medio maggiore per la popolazione dei patologici rispetto quella dei sani e, all'interno della popolazione stessa, un range maggiore per le prove ad occhi chiusi e sulla superficie compliant. Una mappa maggiormente dispersiva indica una minore stabilità del COP: il corpo tende a fare aggiustamenti compensatori più frequenti, veloci e meno precisi (che ci aspettiamo in condizioni di prova più complessa o nel caso di deficit e patologie).

Si riportano in seguito dei grafici che rappresentano i risultati calcolati con MATLAB per le due popolazioni e per le diverse condizioni.

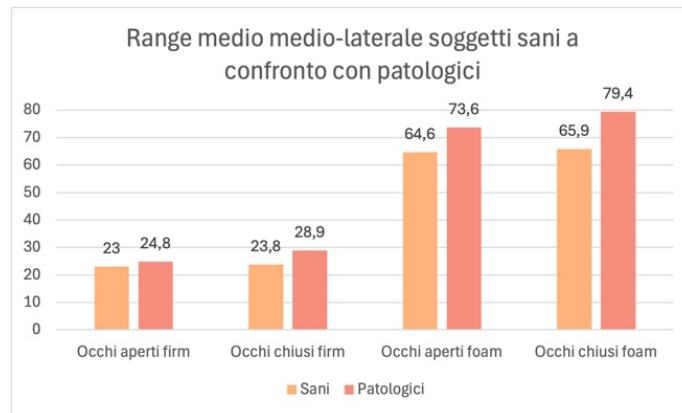


Figura 25: Popolazioni di sani e patologici a confronto, considerando le diverse condizioni delle prove di postura statica analizzate, range medio delle celle calcolato in direzione medio-laterale.

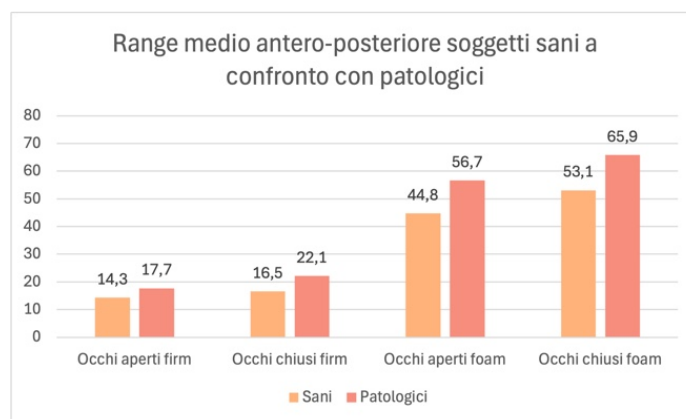


Figura 26: Popolazioni di sani e patologici a confronto, considerando le diverse condizioni delle prove di postura statica analizzate, range medio delle celle calcolato in direzione antero-posteriore.

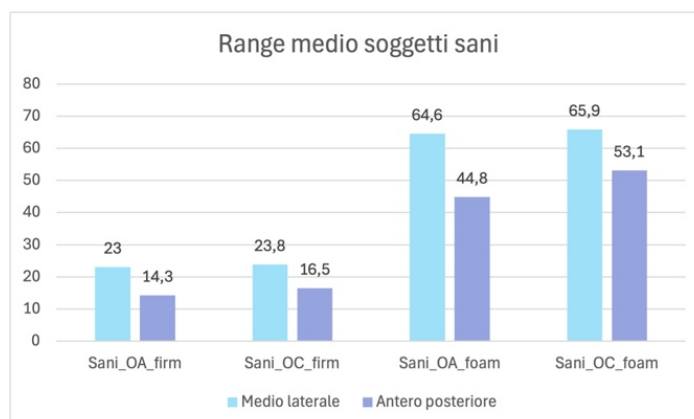


Figura 27: Diverse condizioni delle prove di postura statica analizzate per la popolazione dei soggetti sani, confrontando il range medio delle celle calcolato sia in direzione medio-laterale che antero-posteriore.

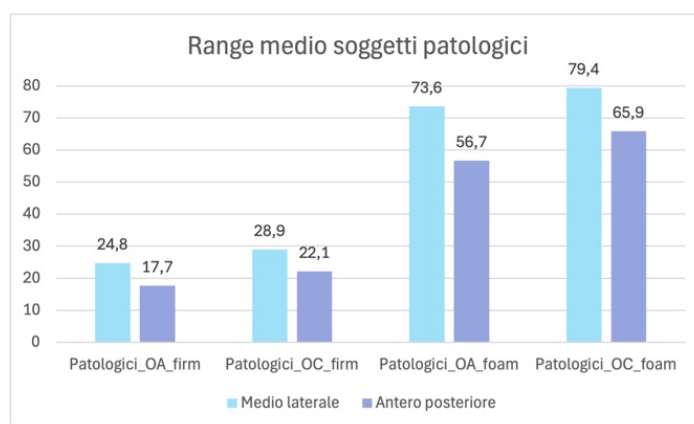


Figura 28: Diverse condizioni delle prove di postura statica analizzate per la popolazione dei soggetti patologici, confrontando il range medio delle celle calcolato sia in direzione medio-laterale che antero-posteriore.

Come è evidente dalle rappresentazioni, il range medio di celle occupato:

- aumenta di qualche unità nel caso si considerino patologici (Figura 25 e Figura 26);
- aumenta di qualche unità nel caso si effettuino prove ad occhi chiusi (Figura 25, Figura 26, Figura 27 e Figura 28);
- aumenta notevolmente nel caso si studino prove più complesse (su superficie *foam*) (Figura 25, Figura 26, Figura 27 e Figura 28);

3.3 Analisi del numero medio di celle con occorrenze maggiori di specifiche soglie

Anche in questo caso, analizzando il valore numerico medio tra le celle con occorrenze maggiori della soglia, si ha una caratterizzazione della dispersione e della variabilità del COP. Tuttavia, l'andamento di questo parametro è del tutto differente rispetto a quanto sopra analizzato per il range medio. Infatti, poiché indica in media quante volte il COP periste nelle celle della piattaforma con occorrenze al di sopra della soglia, maggiore è il valore numerico medio trovato, minore è la dispersione della traiettoria. Se il valore è elevato la traiettoria risulta più compatta, dimostrando un miglior controllo posturale che non necessita di grandi aggiustamenti oscillatori. Ad esempio, se considerando il valore medio delle celle con occorrenze maggiori di 20, questo risulta essere poco al di sopra della soglia, concludiamo che al massimo, le celle selezionate, hanno una persistenza del COP al loro interno di circa 0,2 secondi (o poco più). Al contrario, se il risultato numerico ottenuto è circa il doppio del valore

della soglia, questo significa che nelle celle selezionate il COP persiste in media 0,4 secondi determinando una traiettoria meno dispersiva.

Ciò che ci si aspetta, in base a quanto è stato già detto, è un valore medio più alto per la popolazione dei sani e, all'interno della popolazione stessa, maggiore per le prove ad occhi aperti e su superficie stabile. Dunque, rispetto a quanto visto per il range medio, l'andamento è opposto.

Si riportano in seguito dei grafici che rappresentano i risultati calcolati con MATLAB per le due popolazioni e per le diverse condizioni.

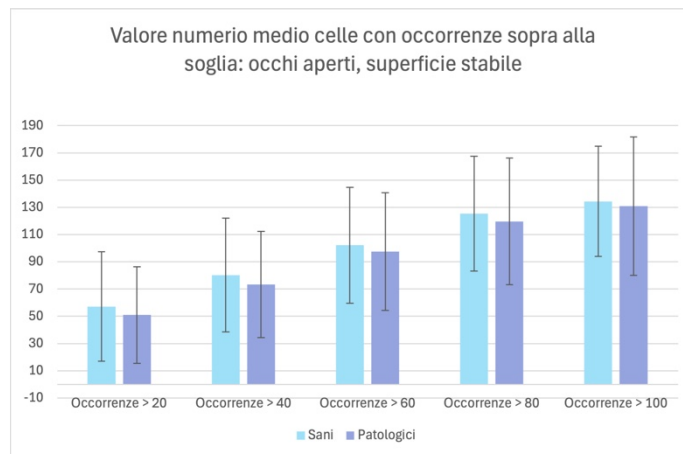


Figura 29: Confronto tra sani e patologici del numero medio delle celle con occorrenze sopra a specifiche soglie per prove ad occhi aperti, su superficie stabile

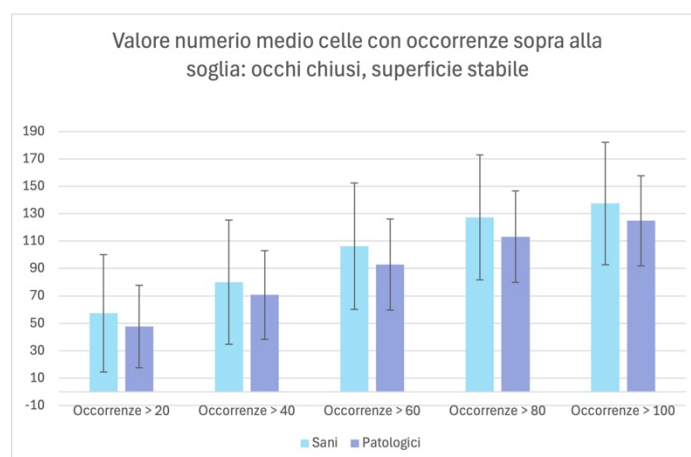


Figura 30: Confronto tra sani e patologici del numero medio delle celle con occorrenze sopra a specifiche soglie per prove ad occhi chiusi, su superficie stabile

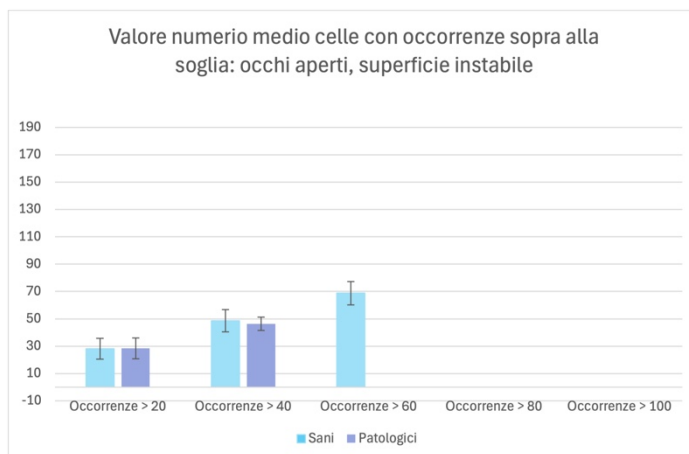


Figura 31: Confronto tra sani e patologici del numero medio delle celle con occorrenze sopra a specifiche soglie per prove ad occhi aperti, su superficie instabile

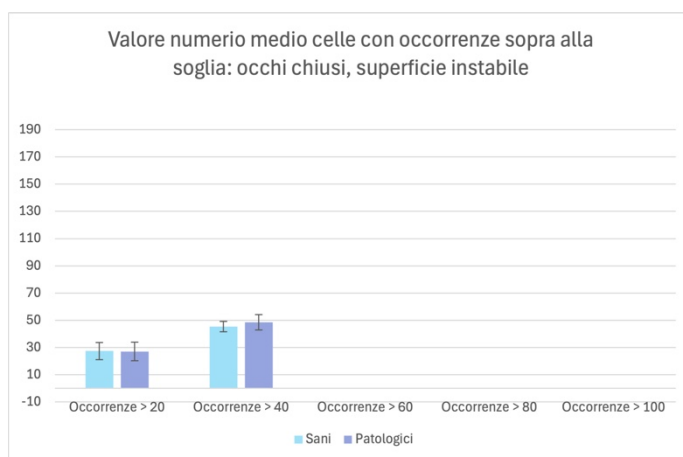


Figura 32: Confronto tra sani e patologici del numero medio delle celle con occorrenze sopra a specifiche soglie per prove ad occhi chiusi, su superficie stabile

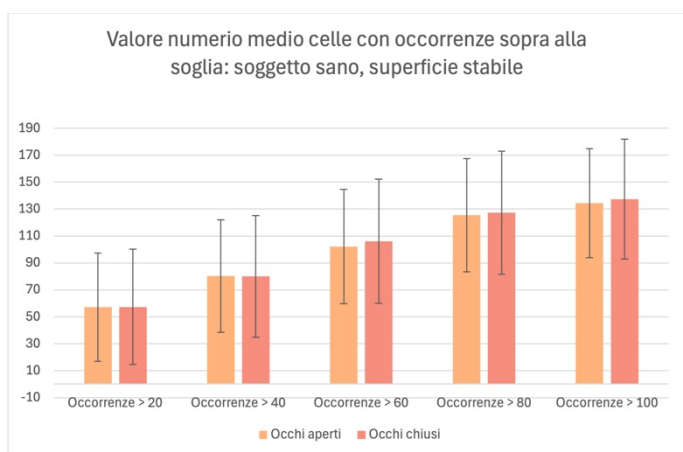


Figura 33: Confronto del numero medio delle celle con occorrenze sopra a specifiche soglie tra prove ad occhi aperti e occhi chiusi, soggetti sani, su superficie stabile

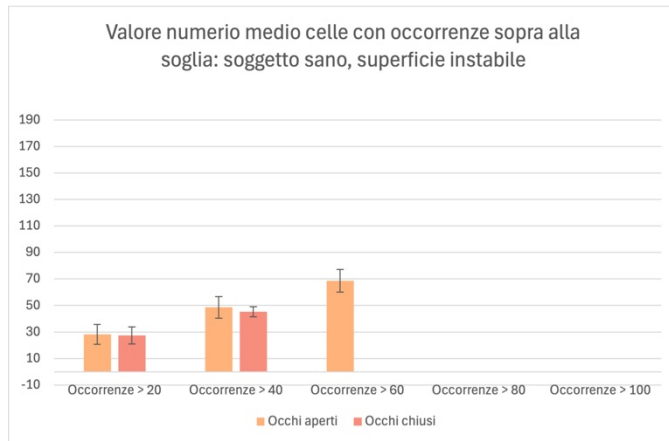


Figura 34: Confronto del numero medio delle celle con occorrenze sopra a specifiche soglie tra prove ad occhi aperti e occhi chiusi, soggetti sani, su superficie instabile

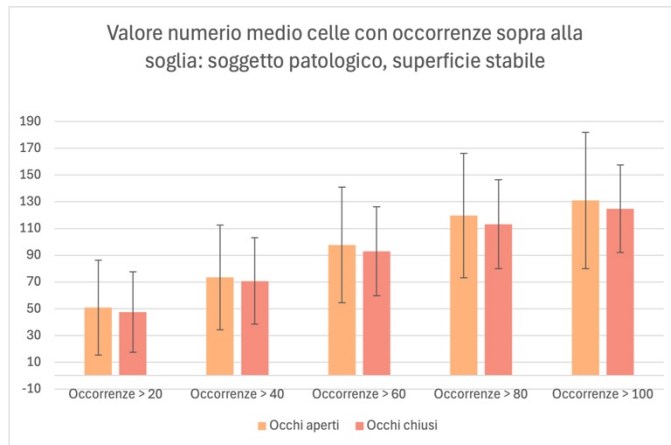


Figura 35: Confronto del numero medio delle celle con occorrenze sopra a specifiche soglie tra prove ad occhi aperti e occhi chiusi, soggetti patologici, su superficie stabile

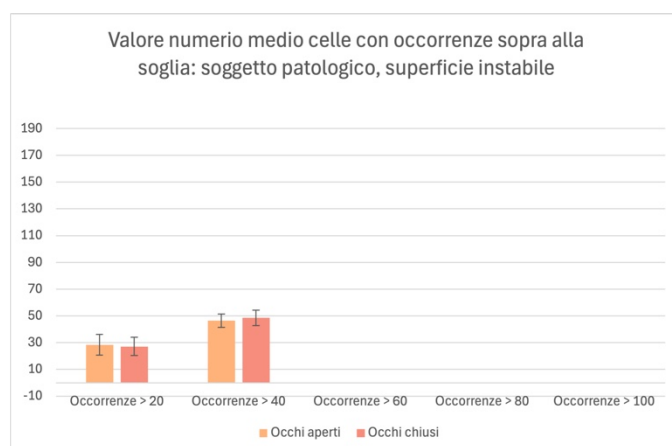


Figura 36: Confronto del numero medio delle celle con occorrenze sopra a specifiche soglie tra prove ad occhi aperti e occhi chiusi, soggetti patologici, su superficie instabile

Dalle rappresentazioni emerge che il valore medio delle celle con occorrenze sopra alle soglie:

- aumenta di qualche unità nel caso si considerino sani rispetto ai patologici (Figura 29, Figura 30, Figura 31 e Figura 32);
- nel caso si effettuino prove ad occhi chiusi o ad occhi aperti il valore rimane pressoché lo stesso (in particolare se consideriamo la superficie *firm*) (Figura 33 e Figura 35);
- aumenta di quasi il doppio nel caso si applichino prove meno complesse su superficie *firm*. Nel caso si considerino le prove su una superficie instabile, i valori sono circa pari alla soglia imposta o poco maggiori (di qualche unità), al contrario, considerando le prove su una superficie stabile i valori sono circa il doppio della soglia (Figura 29, Figura 30, Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35 e Figura 36).

3.4 Analisi della posizione e del numero di celle con occorrenze maggiori di specifiche soglie

Infine, per ogni cella con il numero di occorrenze sopra alla soglia indicata, è stata trovata la posizione all'interno della piattaforma di forza. La pedana è stata idealmente divisa in quattro quadranti (Figura 36) e si è contato il numero di celle totali in ogni quadrante. Il primo quadrante corrisponde alla porzione in alto a destra della pedana e comprende dalla 301-esima alla 600-esima cella nell'asse x e dalla prima alla 200-esima cella nell'asse y. Il secondo quadrante corrisponde alla porzione in basso a destra della pedana e comprende dalla 301-esima alla 600-esima cella nell'asse x e dalla 201-esima alla 400-esima cella nell'asse y. Il terzo quadrante corrisponde alla porzione in basso a sinistra della pedana e comprende dalla prima alla 300-esima cella nell'asse x e dalla 201-esima cella alla 400-esima cella nell'asse y. Il quarto quadrante corrisponde alla porzione in alto a sinistra della pedana e comprende dalla prima alla 300-esima cella nell'asse x e dalla prima alla 200-esima cella nell'asse y.

La posizione delle celle all'interno della piattaforma è stata ricercata al fine di individuare se ci sono eventuali punti all'interno della base di appoggio in cui il COP rimane più assiduamente, identificando una zona caratteristica della traiettoria durante la prova statica. Un'area della mappa in cui il COP persiste in modo particolare è una parte di sicurezza e stabilità in cui si trovano le celle con maggiore incidenza.

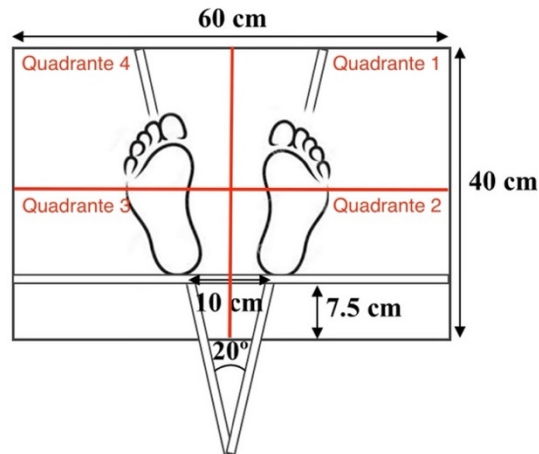


Figura 37: Rappresentazione della piattaforma di forza utilizzata per le prove di postura statica [16], in cui si mostra la suddivisione in quadranti scelta per l'analisi della posizione e del numero di celle con occorrenze maggiori di specifiche soglie.

Si riportano in seguito dei grafici che rappresentano i risultati calcolati con MATLAB per le due popolazioni e per le diverse condizioni.

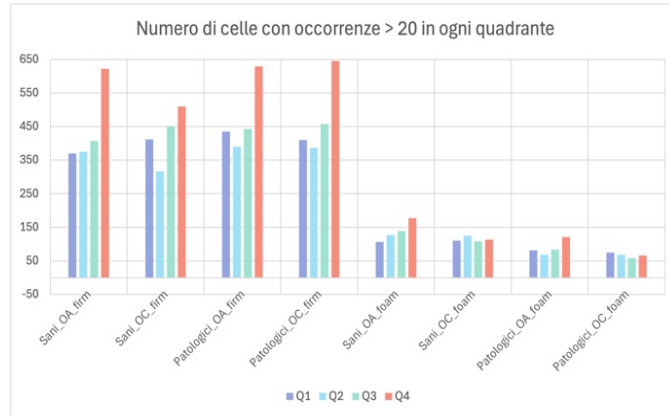


Figura 38: Numero di celle con occorrenze > 20 in ogni quadrante, al variare delle condizioni e della popolazione.

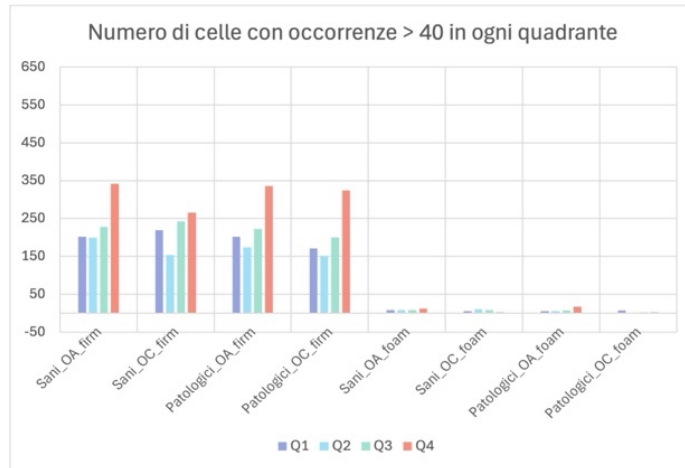


Figura 39: Numero di celle con occorrenze > 40 in ogni quadrante, al variare delle condizioni e della popolazione.

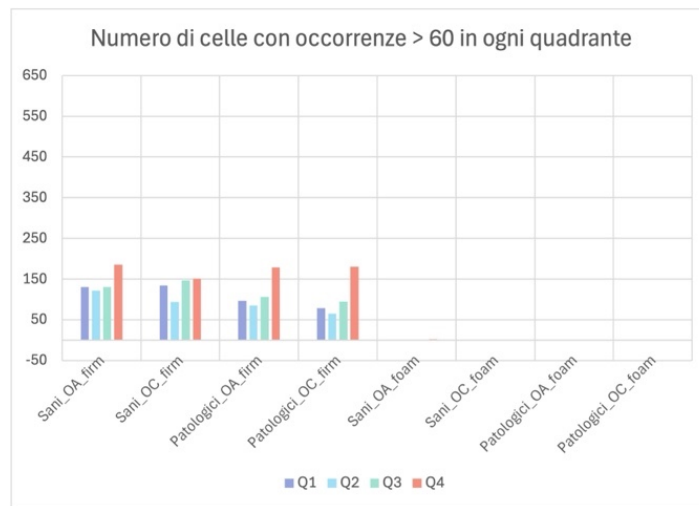


Figura 40: Numero di celle con occorrenze > 60 in ogni quadrante, al variare delle condizioni e della popolazione.

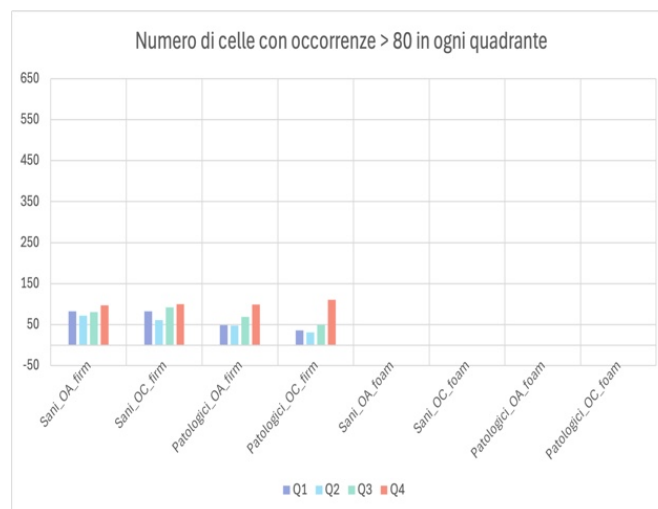


Figura 41: Numero di celle con occorrenze > 80 in ogni quadrante, al variare delle condizioni e della popolazione.

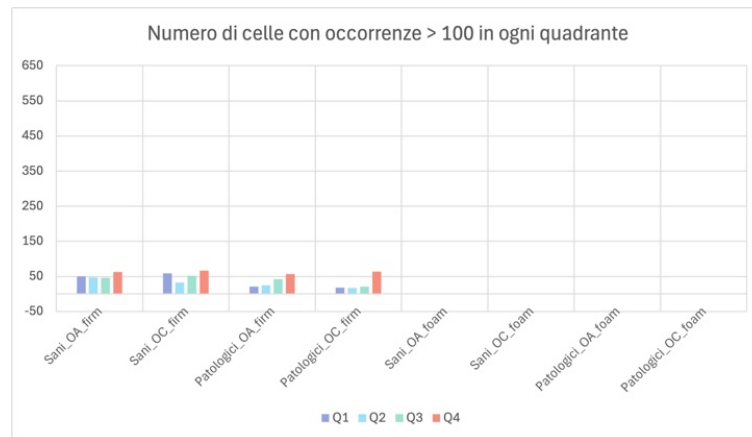


Figura 42: Numero di celle con occorrenze > 100 in ogni quadrante, al variare delle condizioni e della popolazione.

L'analisi evidenzia omogeneità nella distribuzione delle celle nelle prove sulla superficie compliant, sia per i soggetti sani che per i soggetti patologici (Figura 38, Figura 39, Figura 40, Figura 41 e Figura 42). Infatti, come emerge dai grafici non si ha nessun quadrante che presenta un numero molto elevato di celle rispetto agli altri. Questo aspetto evidenzia che, aumentando la difficoltà della prova, con una base di appoggio instabile, gli aggiustamenti del corpo per mantenere l'equilibrio non si concentrano in nessuna parte specifica della piattaforma, testimoniando una maggiore variabilità della traiettoria del COP e maggiori oscillazioni. Al contrario (Figura 38, Figura 39, Figura 40, Figura 41 e Figura 42), nelle prove su una superficie stabile, si nota con particolare rilevanza che le celle con valore numerico sopra ad una specifica soglia si concentrano principalmente nel quarto quadrante (in particolare se consideriamo soglie basse). Questo sottolinea una zona di maggior controllo e sicurezza durante la prova statica per il corpo, predominando il mantenimento della traiettoria del COP in una specifica porzione della pedana. Il fatto che la distribuzione delle celle si concentri sul quarto quadrante è conforme al modello del pendolo inverso con cui si caratterizza il corpo umano. Infatti, il COM, essendo geometricamente posizionato anteriormente rispetto al COP, per equilibrare gli sbilanciamenti del centro di massa, il centro di pressione tende a spostarsi in avanti, cioè nella zona anteriore della piattaforma. Il fatto che ci sia una maggiore incidenza nella parte a sinistra della base di appoggio rispetto a quella di destra potrebbe essere dettato da molti fattori, quali: una distribuzione non omogenea della massa dei soggetti, una sistemazione del sistema di riferimento non perfettamente centrale o un posizionamento del soggetto non del tutto corretto durante la prova statica.

3.5 Analisi statistica

Al fine di valutare l'importanza dei parametri selezionati, si propone l'analisi statistica delle metriche precedentemente viste. Inizialmente sono state studiati i dati disponibili per concludere che non sono distribuiti normalmente. Dunque, è stato utilizzato un test di analisi non parametrico. In particolare, è stato scelto il “test dei ranghi di Wilcoxon” che è l'alternativa non parametrica al più conosciuto test t per il confronto delle medie di due gruppi tra loro indipendenti. Il test non parametrico sfrutta la trasformazione dei valori osservati in ranghi (degli indici più robusti rispetto ai valori anomali ed asimmetrie) e restituisce in output il p -value. Per l'applicazione del test è necessario che si considerino solo due gruppi e, inoltre, i due gruppi devono essere estratti in maniera tra loro indipendente e casuale dalle loro rispettive popolazioni. L'obiettivo è stabilire se c'è sufficiente evidenza nei dati per affermare che due gruppi presentino differenze significative considerando un particolare indice. L'ipotesi nulla (H_0) è quindi che non sia presente nessuna tendenza da parte di una delle due popolazioni e, quindi, che i due indici siano uguali per entrambi i gruppi, l'ipotesi alternativa (H_1) è che una tendenza invece sia presente, con differenze significative negli indici considerati per i due gruppi. Per poter stabilire se accettare o meno l'ipotesi nulla, come prima cosa si ordinano i valori della variabile dal più piccolo al più grande, senza tenere conto della suddivisione nei due gruppi. Quindi si fa la somma dei ranghi dei due gruppi e si divide per il numero di osservazioni presenti in ogni gruppo. La statistica test confronta proprio le medie campionarie dei ranghi e potrebbero capitare due situazioni:

- il rango medio è lo stesso, o sufficientemente simile nei due gruppi da far sì che si accetta l'ipotesi nulla che l'indice della distribuzione è lo stesso per entrambe le popolazioni;
- si ha una differenza tale, tra i due ranghi medi, che un gruppo tende ad avere valori significativamente più elevati dell'altro. In altri termini, a favore dell'ipotesi alternativa, la distribuzione del reddito è diversa nelle due popolazioni.

Il test restituisce il p -value:

- p -value superiore ad α non c'è evidenza di una differenza statisticamente significativa tra le due distribuzioni.
- p -value è inferiore ad α : c'è evidenza a favore di una differenza statisticamente significativa tra i due gruppi.

L'alpha (α) nel contesto dell'analisi statistica rappresenta il livello di significatività, ovvero la soglia utilizzata per decidere se rifiutare l'ipotesi nulla (H_0). Un valore comune per α è 0,05, che ha i seguenti significati con un grado di confidenza del 95% che nelle due distribuzioni c'è evidenza di una differenza.

Di seguito si riportano in tabelle i valori di *p-value* calcolati considerando i parametri precedentemente descritti.

Indice considerato per l'analisi statistica: numero medio delle celle con occorrenze maggiori delle specifiche soglie

| <i>p-value</i> | | | | | |
|--------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Analisi statistica tra sani e patologici, superficie stabile | | | | | |
| | Occorrenze > 20 | Occorrenze > 40 | Occorrenze > 60 | Occorrenze > 80 | Occorrenze > 100 |
| Occhi aperti | 0.151 | 0.301 | 0.030 | 0.239 | 0.226 |
| Occhi chiusi | 0.100 | 0.287 | 0.057 | 0.052 | 0.055 |

Tabella 2

| <i>p-value</i> | | | | | |
|----------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Analisi statistica tra sani e patologici, superficie instabile | | | | | |
| | Occorrenze > 20 | Occorrenze > 40 | Occorrenze > 60 | Occorrenze > 80 | Occorrenze > 100 |
| Occhi aperti | 0.052 | 0.121 | 0.162 | NaN | NaN |
| Occhi chiusi | 0.068 | 0.476 | NaN | NaN | NaN |

Tabella 3

| <i>p-value</i> | | | | | |
|------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Analisi statistica tra superficie stabile e superficie instabile | | | | | |
| Sani | | | | | |
| | Occorrenze > 20 | Occorrenze > 40 | Occorrenze > 60 | Occorrenze > 80 | Occorrenze > 100 |
| Occhi aperti | 0.0000343 | 0.0000179 | 0.0000179 | 0.0000267 | 0.0000395 |
| Occhi chiusi | 0.0000342 | 0.0000178 | 0.0000268 | 0.0000586 | 0.0000589 |
| Patologici | | | | | |
| | Occorrenze > 20 | Occorrenze > 40 | Occorrenze > 60 | Occorrenze > 80 | Occorrenze > 100 |
| Occhi aperti | 0.0000386 | 0.0000179 | 0.0000181 | 0.0000180 | 0.0000837 |
| Occhi chiusi | 0.0000181 | 0.0000180 | 0.0000181 | 0.0000266 | 0.0000841 |

Tabella 4

| <i>p-value</i> | | | | | |
|----------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Analisi statistica tra occhi aperti e occhi chiusi | | | | | |
| Sani | | | | | |
| | Occorrenze > 20 | Occorrenze > 40 | Occorrenze > 60 | Occorrenze > 80 | Occorrenze > 100 |
| Superficie stabile | 0.686 | 0.027 | 0.120 | 0.547 | 0.686 |
| Superficie instabile | 1.000 | 0.172 | 0.500 | 1.000 | 1.000 |
| Patologici | | | | | |
| | Occorrenze > 20 | Occorrenze > 40 | Occorrenze > 60 | Occorrenze > 80 | Occorrenze > 100 |
| Superficie stabile | 0.237 | 0.130 | 0.301 | 0.269 | 0.237 |
| Superficie instabile | 1.000 | 0.406 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

Tabella 5

In accordo con quanto evidenziato precedentemente dai grafici, possiamo concludere che la differenza che si nota nel numero medio di celle con occorrenze maggiori delle specifiche soglie:

- non è statisticamente significativa se i gruppi considerati sono le popolazioni di sani e patologici, a prescindere dalla condizione e dalla superficie (Tabella 2 e Tabella 3) ($p\text{-value} > 0,05$);
- è statisticamente significativa se i gruppi di studio sono i dati delle prove su superficie stabile e su superficie instabile, sia per i soggetti sani che patologici, sia per le prove ad occhi aperti che per le prove ad occhi chiusi (Tabella 4) ($p\text{-value} > 0,05$);
- non è statisticamente significativa se i gruppi di studio sono i dati delle prove ad occhi chiusi e ad occhi aperti, sia per i soggetti sani che patologici, sia per la superficie stabile che instabile (Tabella 5) ($p\text{-value} > 0,05$);

Indice considerato per l'analisi statistica: range medio delle celle occupate con occorrenze maggiori di zero (dispersione delle celle)

| <i>p-value</i> | | | | |
|------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| Analisi statistica tra sani e patologici | | | | |
| | Occhi aperti, superficie stabile | Occhi chiusi, superficie stabile | Occhi aperti, superficie instabile | Occhi chiusi, superficie instabile |
| Medio- laterale | 0.536 | 0.041 | 0.049 | 0.013 |
| Antero- posteriore | 0.036 | 0.043 | 0.002 | 0.009 |

Tabella 6

| <i>p-value</i> | | | | |
|------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Analisi statistica tra superficie stabile e superficie instabile | | | | |
| | Sani | | Patologici | |
| | Occhi aperti | Occhi chiusi | Occhi aperti | Occhi chiusi |
| Medio-laterale | 0.0000180 | 0.0000180 | 0.0000179 | 0.0000181 |
| Antero-posteriore | 0.0000179 | 0.0000181 | 0.0000181 | 0.0000179 |

Tabella 7

| <i>p-value</i> | | | | |
|----------------------------------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| Analisi statistica tra occhi aperti e occhi chiusi | | | | |
| | Sani | | Patologici | |
| | Superficie stabile | Superficie instabile | Superficie stabile | Superficie instabile |
| Medio-laterale | 0.732 | 0.637 | 0.051 | 0.205 |
| Antero-posteriore | 0.532 | 0.015 | 0.696 | 0.003 |

Tabella 8

A testimonianza dell'analisi precedentemente fatta, la differenza che si nota nel range medio delle celle occupate con occorrenze maggiori di zero:

- è statisticamente significativa se i gruppi considerati sono le popolazioni di sani e patologici, a prescindere dalla condizione e dalla superficie, sia per la componente medio-laterale che antero-posteriore (Tabella 6) ($p\text{-value} > 0,05$);
- è statisticamente significativa se i gruppi di studio sono i dati delle prove su superficie stabile e su superficie instabile, sia per i soggetti sani che patologici, sia per le prove ad

occhi aperti che per le prove ad occhi chiusi, sia per la componente medio-laterale che antero-posteriore (Tabella 7) ($p\text{-value} > 0,05$);

- non è statisticamente significativa se i gruppi di studio sono i dati delle prove ad occhi chiusi e ad occhi aperti, sia per i soggetti sani che patologici, sia per la superficie stabile che instabile, sia per la componente medio-laterale che antero-posteriore (Tabella 8) ($p\text{-value} > 0,05$);

Indice considerato per l'analisi statistica: valore numerico medio associato a tutte le celle con occorrenze maggiori di specifiche soglie scelte

| <i>p-value</i> | | | | | |
|--------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Analisi statistica tra sani e patologici, superficie stabile | | | | | |
| | Occorrenze > 20 | Occorrenze > 40 | Occorrenze > 60 | Occorrenze > 80 | Occorrenze > 100 |
| Occhi aperti | 0.124 | 0.228 | 0.516 | 0.370 | 0.353 |
| Occhi chiusi | 0.021 | 0.025 | 0.054 | 0.050 | 0.052 |

Tabella 9

| <i>p-value</i> | | | | | |
|----------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Analisi statistica tra sani e patologici, superficie instabile | | | | | |
| | Occorrenze > 20 | Occorrenze > 40 | Occorrenze > 60 | Occorrenze > 80 | Occorrenze > 100 |
| Occhi aperti | 0.190 | 0.071 | 0.162 | NaN | NaN |
| Occhi chiusi | 1.000 | 0.591 | NaN | NaN | NaN |

Tabella 10

p-value
Analisi statistica tra occhi aperti e occhi chiusi

| Sani | | | | | |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| | Occorrenze > 20 | Occorrenze > 40 | Occorrenze > 60 | Occorrenze > 80 | Occorrenze > 100 |
| Superficie stabile | 0.932 | 0.753 | 0.841 | 0.927 | 0.426 |
| Superficie instabile | 0.060 | 0.007 | 0.500 | 1.000 | 1.000 |

| Patologici | | | | | |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| | Occorrenze > 20 | Occorrenze > 40 | Occorrenze > 60 | Occorrenze > 80 | Occorrenze > 100 |
| Superficie stabile | 0.056 | 0.116 | 0.063 | 0.097 | 0.274 |
| Superficie instabile | 0.236 | 0.844 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

Tabella 11

p-value
Analisi statistica tra superficie stabile e superficie instabile

| Sani | | | | | |
|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| | Occorrenze > 20 | Occorrenze > 40 | Occorrenze > 60 | Occorrenze > 80 | Occorrenze > 100 |
| Occhi aperti | 0.0000182 | 0.0000182 | 0.0000182 | 0.0000270 | 0.00004 |
| Occhi chiusi | 0.0000182 | 0.0000182 | 0.0000270 | 0.0000596 | 0.00006 |

| Patologici | | | | | |
|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| | Occorrenze > 20 | Occorrenze > 40 | Occorrenze > 60 | Occorrenze > 80 | Occorrenze > 100 |
| Occhi aperti | 0.0000182 | 0.0000182 | 0.0000182 | 0.0000182 | 0.0000886 |
| Occhi chiusi | 0.0000182 | 0.0000182 | 0.0000182 | 0.0000270 | 0.0000884 |

Tabella 12

Anche in questo caso, in accordo con i grafici sopra riportati e a testimonianza dell'analisi precedentemente fatta, la differenza che si nota nel numero medio associato a tutte le celle con occorrenze maggiori di specifiche soglie scelte:

- non è statisticamente significativa se i gruppi considerati sono le popolazioni di sani e patologici, a prescindere dalla condizione e dalla superficie (Tabella 9 e Tabella 10) ($p\text{-value} > 0,05$);
- non è statisticamente significativa se i gruppi di studio sono i dati delle prove ad occhi chiusi e ad occhi aperti, sia per i soggetti sani che patologici (Tabella 11) ($p\text{-value} > 0,05$);
- è statisticamente significativa se i gruppi di studio sono i dati delle prove su superficie stabile e su superficie instabile, sia per i soggetti sani che patologici, sia per le prove ad occhi aperti che per le prove ad occhi chiusi (Tabella 12) ($p\text{-value} < 0,05$);

L'analisi statistica del parametro che indica in quale quadrante della piattaforma di forza e quante sono numericamente, in quel dato quadrante, le celle selezionate, non viene riportata in quanto i risultati ottenuti mostrano che l'indice non è statisticamente significativo.

CONCLUSIONI

Nel lavoro proposto si riporta un approfondimento sulla postura statica e sul ruolo che il corpo ha per il mantenimento dell'equilibrio, con lo scopo di comprendere le dinamiche del centro di pressione analizzandone i punti di aggregazioni spaziali e temporali registrati durante prove di stabilometria statica.

Utilizzare una *heatmap* per visualizzare i dati del COP può offrire diversi vantaggi:

- permette di rappresentare graficamente la traiettoria del COP, evidenziando le aree in cui persiste per più tempo. Ciò facilita l'identificazione di pattern e comportamenti soprattutto per una prima analisi visiva e qualitativa;
- attraverso la colorazione, è possibile selezionare rapidamente le zone di maggiore e minore stabilità, aiutando ad analizzare le variazioni di comportamento nel mantenimento dell'equilibrio;
- evidenzia differenze significative dando informazioni su come condizioni diverse di soggetti diversi influenzano l'equilibrio;
- permette di osservare le tendenze nel movimento del COP nel tempo, come oscillazioni o spostamenti, fornendo informazioni sui meccanismi di controllo posturale.

Il lavoro di tesi ha infine raggiunto gli obiettivi che si erano proposti. Nonostante il campione di studio non fosse particolarmente numeroso, dall'analisi svolta sul centro di pressione in postura statica, sono stati selezionati quattro parametri che possono essere utilizzati per caratterizzare il centro di pressione di una popolazione e di una specifica condizione. Gli indici studiati sono:

- 1) il numero medio di punti della piattaforma che presentano un certo livello di persistenza nel tempo della traiettoria del COP: restituisce indicazioni in termini temporali;
- 2) il range medio della dispersione del COP sia in direzione antero-posteriore che medio-laterale: restituisce indicazioni in termini spaziali;
- 3) il numero medio di tempo che la traiettoria del COP persiste in determinati punti della piattaforma di forza: restituisce indicazioni in termini spaziali;

- 4) la posizione nella piattaforma di forza dei punti a più alta persistenza della traiettoria del COP: in quale quadrante della piattaforma di forza si trovano e quanti sono numericamente: restituisce indicazioni in termini spaziali.

Come dimostrato anche dall'analisi statistica, le metriche scelte risultano essere significative soprattutto per descrivere:

- le differenze tra due diverse popolazioni (sani e patologici);
- le differenze tra le prove acquisite, a parità di popolazione, in differenti superfici (stabili, instabili);

Le rappresentazioni grafiche utilizzate, ovvero mappe di calore che evidenziano i valori della traiettoria del centro di pressione su un piano, consentono principalmente un'analisi visiva e qualitativa. Tuttavia, si è dimostrato che è possibile descrivere i dati acquisiti con una piattaforma di forza con questa tecnica, analizzando soprattutto l'intensità dei valori e la dispersione dei valori stessi all'interno del piano di immagine.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Lazzeri E., «La postura. I fondamenti», Edizioni Martina, 2006.
- [2] Mazzola M., Fici C., Palmieri S., Carini F., «Posture and posturology, anatomical and physiological profiles: overview and current state of art», Acta Biomed, 2017.
- [3] Gagey P.M., «Posturologia. Regolazione e perturbazioni della stazione eretta», Marrapese editore, Roma 2000.
- [4] Trevisson P., Riva D., «Il controllo posturale», Sport&Medicina, 2000.
- [5] Casabona F., «Teoria e metodologia del movimento - Metodi di studio del movimento umano» PhD thesis, Facoltà di Medicina e Chirurgia e Scienze della Formazione-Università di Catania, 2004.
- [6] Horak F.B., Nashner L. M., «Central Programming of Postural Movements: Adaptation to altered Support- Surface Configurations», Journal of Neurophysiology, 1986.
- [7] Yang J. F., Scholz J. P., Krishnamoorthy V., «Joint coordination during quiet stance: effects of vision», Experimental Brain Research, 2005.
- [8] Cesarani A., Alpini D., «Terapia delle vertigini e del disequilibrio. Il metodo MCS.», Springer-Verlag, Milano, 2000.
- [9] Ghez C., «La postura. Scienze neurologiche e del movimento», 2003.
- [10] Hayes K. C., «Biomechanics of postural control», Exerc Sport Sci Rev, 1982.
- [11] Stortini M., Gianarelli P., Cherubini S., «Rapporto postura/movimento: training specifico per la stabilità e l'azione», Europa Medicophysica, 2008.
- [12] Puglisi F., «Biomeccanica, introduzione alle misure strumentali di postura e movimento», Marrapese editore, Roma 2007.
- [13] Massion J., «Postural control system», Curr. Opin. Neurobiol, 1994
- [14] Yoshikazu K., Shu O., Daisuke S., «Ankle and hip balance control strategies with transitions», 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010.
- [15] Ferraresi C., «Slide del corso: Biomeccanica applicata ai sistemi biomedici».
- [16] Gage W.H., Winter D.A., Frank A.L, Adkin J.S., «Kinematic and kinetic validity of the inverted pendulum model in quiet standing», Gait and Posture, 2004.
- [17] Winter D.A., Prince F., Frank J.S., Powell C., Zabjek K.F., «Unified Theory Regarding A/P and M/L Balance in Quiet Stance», Journal of Neurophysiology, 1996.
- [18] Politecnico di Torino, «Postura e deambulazione», Internet:
<http://elite.polito.it/files/courses/01OQM/slide2014/32-postura-deambulazione.pdf>
- [19] Cappello A., Cappelozzo A., Di Prampero P. E., «Analisi Posturografica in Bioingegneria

- della postura e del movimento», Pàtron Editore, 2003.
- [20] Raniolo M., «Sviluppo di un modello di pendolo inverso virtuale per il training del controllo posturale tramite l'attivazione dei muscolo del tricipite surale», PhD thesis, Facoltà di Ingegneria Biomedica-Università di Torino, 2018
- [21] Santos D., Duarte M., «A public data set of human balance evaluations», PeerJ, vol. 11, 2016.
- [22] Asai Y., Tasaka Y., Nomura K., Nomura T., Casadio M., Morasso P., «A model of postural control in quiet standing: Robust compensation of delay-induced instability using intermittent activation of feedback control», PloS one, 2009.
- [23] Ghai S., Schieppati M., Sozzi S., «Incongruity of Geometric and Spectral Markers in the Assessment of Body Sway», Frontiers in Neurology, 2022.
- [24] Fransson P. A., Lush D., Gomez S., Patel M., «The effect of foam surface properties on postural stability assessment while standing», Gait & Posture, 2008.
- [25] Rémy-Neris O., Forestier N., Picot B., «Proprioceptive postural control strategies differ among non-injured athletes», Neuroscience Letters, 2022.
- [26] Mavridi D., Bohm S., Mademli L., «Standing on unstable surface challenges postural control of tracking tasks and modulates neuromuscular adjustments specific to task complexity», Scientific Reports, 2021.