



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

Corso di Laurea in INGEGNERIA BIOMEDICA

**IL RUOLO DEL FEEDBACK VISIVO  
NELL'ANALISI DELLA POSTURA DI  
SOGGETTI DIABETICI.  
POSTURAL ANALYSIS OF DIABETIC  
SUBJECTS: ROLE OF VISUAL FEEDBACK.**

Relatore:

**Prof.ssa FEDERICA VERDINI**

Tesi di Laurea di

**BEATRICE POMPEI**

Correlatori:

**Dott. ALESSANDRO MENGARELLI**

**Dott. ANDREA TIGRINI**

A 2020/2021

# ABSTRACT

È diventato di grande interesse analizzare le relazioni tra i sintomi di una malattia e le conseguenze rispetto la postura per fornire al medico e/o clinico delle informazioni utili per poter supportare una diagnosi e in seguito scegliere un'adeguata terapia.

Nel presente documento si è approfondito principalmente il ruolo del feedback visivo: studiando le traiettorie del center of pressure (COP), ricavate dall'analisi posturografica, si possono individuare patterns differenti tra soggetti.

Si sono analizzati soggetti affetti da diabete ma con complicanze differenti: alla prima analizzata, chiamata popolazione 1, è stato diagnosticato il diabete senza neuropatia periferica; alla seconda, chiamata popolazione 2, il diabete con lo sviluppo della neuropatia ma senza sintomi; alla terza, la popolazione 3, è stata diagnosticata la neuropatia con sintomi.

I dati sono stati estrapolati dall'articolo scientifico "Identification of peripheral neuropathy in type-2 diabetic subject by static posturography and linear discriminant analysis" di S.Fioretti, M.Scrocco, L.Ladislao, G.Ghetti, R.A. Rabini.

Ogni individuo ha effettuato una doppia misurazione a occhi aperti e chiusi per registrare i dati per poi essere elaborati e clusterizzati.

Precedenti studi, oltre ad aver già dimostrato come la posturografia può identificare differenze significative tra controlli e pazienti diabetici con e senza neuropatia, è riuscita a comprendere come l'analisi del COP fornisca indicatori che possono essere correlati con la presenza di neuropatia ma con lo svantaggio di non fornire alcuna potenza diagnostica.

# INDICE

INTRODUZIONE.....	8
CAPITOLO 1: DIABETE.....	9
1.1 Il diabete e le diverse tipologie.....	9
1.2 Metodi di misurazione del diabete .....	11
1.3 Complicanze macrovascolari e microvascolari .....	12
1.3.1 Piede diabetico.....	16
CAPITOLO 2: ANALISI POSTUROGRAFICA.....	18
2.1 Centro di pressione CoP.....	23
2.1.1 Andamento temporale della posizione del CoP.....	27
2.2 Ruolo del feedback visivo nel mantenimento della postura.....	32
2.3 Quoziente di Romberg e la sua correlazione col il PDS.....	33
CAPITOLO 3: MODALITA' DI ESECUZIONE DELLA PROVA .....	35
3.1 Soggetti considerati.....	35
3.2 Protocollo di misura.....	36
3.2.1 Piattaforma dinamometrica.....	37
CAPITOLO 4: ELABORAZIONE DATI.....	38
4.1 Clustering.....	38
4.1.1 Fuzzy Clustering.....	40
4.1.2 Metriche per valutare la clusterizzazione.....	42
CAPITOLO 5: RISULTATI.....	44
5.1 Confronti, deduzioni e discussione dei dati.....	44
CAPITOLO 6: CONCLUSIONE.....	54
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	55
RINGRAZIAMENTI.....	57

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Possibili infezioni del piede diabetico.....	17
Figura 2: Posizione archi nella pianta del piede.....	19
Figura 3a: Forze che agiscono sulla base d'appoggio.....	23
Figura 3b: Centro di pressione.....	23
Figura 4: Centro di massa.....	24
Figura 5- Statochinesiogramma: spostamento delle coordinate del Cop di un soggetto.....	25
Figura 6- Stabilogramma: spostamento delle componenti del COP in funzione del tempo.....	25
Figura 7- Pedana di forza e scomposizione di una forza sui tre assi.....	27
Figura 8- Statochinesiogramma.....	29
Figura 9- Stabilogramma-spostamenti antero-posteriori.....	30
Figura 10- Andamento temporale tipico delle due componenti della COP: mediolaterale (x COP ) e antero-posteriore(y COP ).....	33
Figura 11- Composizione della popolazione dello studio.....	35
Figura 12 – Piattaforma Kistler 9281E.....	37
Figura 13– Diagramma FCM con due cluster.....	45
Figura 14– Diagramma FCM con due cluster.....	46
Figura 15– Diagramma FCM con due cluster.....	47
Figura 16– Diagramma FCM con tre cluster.....	48
Figura 17– Diagramma FCM con quattro cluster.....	48
Figura 18– Istogramma relativo alla prima popolazione (in percentuale) .....	50

Figura 19– Istogramma relativo alla seconda popolazione (in percentuale).....	51
Figura 20– Istogramma relativo alla terza popolazione (in percentuale).....	52
Figura 21- Istogramma generale (in percentuale).....	52

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: alcuni soggetti con valori del quoziente di Romberg alterati (DNS).....	44
Tabella 2: numero dei soggetti appartenenti ai cluster(DNN).....	49
Tabella 3: numero dei soggetti appartenenti ai cluster(DNA).....	50
Tabella 4: numero dei soggetti appartenenti ai cluster(DNS).....	51

# INDICE DELLE FORMULE

Formula 1: distanza RMS.....	29
Formula 2: RD[n].....	29
Formula 3: velocità media.....	30
Formula 4: quoziente di Romberg.....	33
Formula 5: PDS.....	34
Formula 6: centroide.....	41
Formula 7: coefficienti di silhouette.....	42
Formula 8: criterio rule of thumb .....	43

# INTRODUZIONE

Il controllo della postura umana è un processo multisensoriale in cui il sistema nervoso centrale integra diverse informazioni afferenti. Per la stabilizzazione posturale il sistema visivo è di fondamentale importanza, fornendo il mezzo di percezione più sensibile per l'oscillazione durante la posizione eretta. [1]

Lo scopo finale dell'elaborato sarà classificare diversi soggetti, appartenenti a differenti popolazioni affette da diabete, in un gruppo visivo o non visivo secondo le proprietà del centro di pressione (COP).

# Capitolo 1

## IL DIABETE

In questo capitolo si è deciso di descrivere le caratteristiche della malattia del diabete, con particolare attenzione alle sue complicanze microvascolari che interessano l'analisi posturografica.

Il diabete è una patologia correlata ad uno stato iperglicemico cronico dovuto a una carenza relativa o assoluta di insulina. È una patologia correlata all'età, questa componente è importante soprattutto per il diabete di tipo II, diffusa in larga scala a livello mondiale (in Italia il 5% della popolazione è diabetica, percentuale che nei prossimi anni è destinata a salire all' 8-10%). Si ripercuote su tutti gli organi e apparati e, se non trattata, può essere fatale. Si riconosce una forte componente infiammatoria che coinvolge diversi organi e tessuti.[2]

### 1.1 Le diverse tipologie

Il diabete può essere classificato in diverse categorie generali:

- Diabete di tipo I: è la forma autoimmune, si pensa legata all'esposizione di alcuni determinanti antigenici propri delle beta-cellule verso l'ambiente esterno (come accade nel morbo di Addison) : ad un certo punto alcune componenti delle beta-cellule vengono esposti all'esterno e reagiscono con cellule presentanti l'antigene. Sono coinvolte sia l'immunità mediata da anticorpi che quella cellula-mediata. L'individuo che è affetto ha il fenotipo proprio di un soggetto che soffre di una patologia autoimmune: nonostante gli elevati livelli di glicemia il soggetto ha un basso BMI, non è un soggetto in sovrappeso. Questo tipo di diabete tende a insorgere in giovane età con una manifestazione legata o all'ipoglicemia (manifestazione rara) o all'iperglicemia sostenuta, persistente non trattata.

- Diabete di tipo II: è dovuta a una progressiva perdita di secrezione di insulina nelle cellule frequentemente sullo sfondo della resistenza all'insulina. Si possono mettere in evidenza differenze che riguardano l'emoglobina glicata, ovvero la stima dei

livelli di glucosio nel sangue negli ultimi mesi, BMI, età e HOMA index che è utilizzato per misurare l'insulino-resistenza.

- Diabete mellito gestazionale che viene diagnosticato in gravidanza.
- Diabete dovuto da altre cause.

Il diabete di tipo I e II sono malattie eterogenee e in entrambe, i vari fattori genetici e ambientali possono provocare la progressiva perdita di massa e/o iperglicemia. [2,3]

## 1.2 Metodi di misurazione del diabete

Per diagnosticare il diabete ci sono tre diversi metodi, misurando:

- Glicemia a digiuno, maggiore o uguale a 126 mg/dl
- Emoglobina glicata, maggiore del 6,5%
- Glicemia random, maggiore o uguale di 200 mg/dl

È sufficiente una rilevazione, quindi un solo prelievo, per effettuare la diagnosi.

Non esistono persone quasi diabetiche, a malapena è tollerabile l'aggettivo prediabete, il quale è stato ampiamente sostituito introducendo il concetto di zona grigia come impaired fasting glucose e impaired glucose tolerance. Queste due condizioni sono sfruttate come strumenti per diagnosticare una sindrome metabolica, ma non sono sufficienti a classificare l'individuo come diabetico. A chi soffre di sindrome metabolica vanno consigliati stili di vita che fanno rientrare i valori di glicemia entro la norma: evitare cibi ad alto contenuto glicemico, evitare l'assunzione di zuccheri fuori pasto, fare esercizio moderato e aerobico che consiste in 30 minuti di camminata veloce al giorno per 5 giorni a settimana. L'esercizio sia in maniera diretta che indiretta ha un'efficacia pari alla terapia farmacologica in questi soggetti.[2]

## 1.3 Complicanze macrovascolari e microvascolari

È importante far riferimento anche alle complicanze della patologia diabete perché sono queste che inducono un decisivo aumento nei costi del trattamento e un rapido deterioramento della qualità di vita che potrebbe portare ad esiti negativi. Possono essere complicanze di tipo microvascolare che nascono principalmente dell'endotelio capillare come la retinopatia, la nefropatia e la neuropatia periferica.

A queste si aggiungono complicanze di tipo macrovascolare che coincidono con l'aterosclerosi in tutte le sue manifestazioni:

- Cardiomiopatia ischemica
- Scompenso cardiaco cronico
- Malattie cerebro-vascolari (ictus)
- Arteriopatia periferica (arteriopatia obliterante del circolo degli arti inferiori)

È l'iperglicemia, primariamente, a determinare lo sviluppo di complicanze a seguito del diabete. Innanzitutto è bene precisare che a portare danno non è tanto l'iperglicemia extracellulare quanto quella intracellulare. Ci sono delle cellule resistenti all'iperglicemia, cioè quelle cellule che in presenza di livelli extracellulari di glucosio tendono a down-regolare i loro trasportatori, opponendosi all'entrata di glucosio nel loro contesto citoplasmatico; ne è esempio la cellula muscolare liscia dei vasi. Inoltre, ci sono fattori metabolici che portano a complicanze microvascolari, oltre ai fattori emodinamici, fattori di crescita, fattori intracellulari, fattori immuni ed infine lo stress ossidativo.

Approfondendo le complicanze è bene analizzarle una per una:

- La retinopatia diabetica è la causa più frequente di cecità acquisita in età adulta, viene definita come una serie di alterazioni progressive e ingravescenti del microcircolo della retina.
- La nefropatia diabetica rappresenta una delle cause più frequenti di insufficienza renale nel mondo in età adulta. Seguono per ordine di frequenza, le malattie cardiovascolari come l'ipertensione. Circa il 40% dei soggetti nel caso di diabete di tipo I che di tipo II sviluppa la nefropatia diabetica.
- La neuropatia diabetica, analizzata in questo studio, viene considerata la più comune ma anche la meno diagnosticata ed è anche la più invalidante, insieme alla

retinopatia, poiché impatta in maniera forte sulla qualità della vita del paziente. La mancata diagnosi è legata alla mancata connessione da parte del medico dei sintomi al diabete poiché la neuropatia esordisce con una perdita di sensibilità, formicolii o dolori, che non sono sintomi generici del diabete, bensì un suo caso particolare. In più, come accade nella retinopatia, la perdita di sensibilità è progressiva nel tempo quindi il soggetto può addirittura non accorgersene. Si diventa consapevoli della neuropatia quando si arriva alla condizione di piede diabetico: perdita di sensibilità all'arto inferiore e deficit vascolari, il piede è maggiormente soggetto ad ulcerazioni, ad infezioni (per mancato ricircolo) e tende a deformarsi perché vengono a mancare meccanismi di propriocezione che consentono la contrazione dei muscoli per il mantenimento di una postura corretta. Per alterazione a livello dei nervi le dita tendono ad assumere una caratteristica conformazione a artiglio.

Le manifestazioni di neuropatie sono molteplici:

- La forma più frequente è polineuropatia distale simmetrica con pattern “a guanto” o “a calza”. In questo caso, il coinvolgimento non comprende una singola fibra ma un fascio nervoso diretto a mano e piede, per cui non si fa riferimento a territorio d'innervazione di un nervo, tantomeno a dermatomero.

La sua ingente frequenza è legata al fatto che gli assoni soffrono tanto più la conduzione di iperglicemia tanto più sono estesi: i protagonisti saranno proprio quelli diretti a elementi più distali.

- Altro pattern della neuropatia è la radiocolapata ovvero una perdita di sensibilità in maniera dermatomerica.
- La mononeuropatia non interessa il territorio dermatomerico ma quello d'innervazione di un singolo nervo.
- La neuropatia può essere anche autonoma: questa non prevede perdita di sensibilità ma alterazioni del sistema nervoso autonomo. La stipsi può essere una manifestazione di neuropatia diabetica, così come la riduzione della frequenza cardiaca. Questo tipo di neuropatia è molto più insidiosa della sensoriale perché, a differenza di quest'ultima, richiede maggiore attenzione da parte del medico a riconoscere la sintomatologia. Ad esempio, la neuropatia può far sì che non si percepisca dolore toracico in corso di ischemia miocardica. Altri sintomi associati possono essere

costipazione ma anche all'opposto diarrea; nel sesso maschile è significativa la disfunzione erettile; ancora può manifestarsi la presenza di sudorazione gustativa o le cosiddette "lacrime di coccodrillo" per la presenza di un controllo nervoso mancato a carico della funzione lacrimale e della secrezione salivare.

Sono meno coinvolti i motoneuroni che rimangono intatti; per questo non si hanno deficit motori associati alla neuropatia. Questa risulta quindi essere associata o a perdita di sensibilità o di controllo del sistema nervoso autonomo. La neuropatia è una malattia invalidante poichè induce a un calo della propriocezione, possibilità di percepire dolore, alternazione del termo tatto e alterazione del riconoscimento della sensibilità vibratoria. [2,3,4,5]

Posso distinguere nuovamente la neuropatia in:

- Neuropatia sensitiva dove i pazienti lamentano crampi notturni, formicolii, non sopportano il lenzuolo sulle dita e quando camminano hanno la sensazione di essere su un tappeto o addirittura su una nuvola. Il dolore neuropatico è prevalentemente notturno e tende a regredire con la deambulazione. Talvolta è urente, lancinante, configurando il quadro della neuropatia doloroso. Ci sono dei casi in cui il paziente ha i piedi completamente "addormentati" ma contemporaneamente fortemente dolenti.
- Neuropatia motoria dove il rischio di sviluppare un'ulcera è determinato pertanto da due meccanismi: l'alterata biomeccanica durante il passo conseguente alla neuropatia motoria con sviluppo di aree patologiche di ipercarico plantare e l'assenza di sensibilità che non consente che vengano poste in atto le difese quando l'ipercarico diventa così importante da cominciare ad ulcerare la pelle. Si verificano così dei traumatismi in aree non fisiologicamente predisposte a sopportare carichi così elevati, determinando inizialmente un'abbondante ipercheratosi sotto cui, successivamente, si determina l'ulcerazione.
- Ulcera neuropatica che è sempre contornata da un'estesa e spessa callosità nel cui contesto essa si sviluppa ed è quindi frequentemente localizzata a livello dell'avampiede. La neuropatia distale include anche il

coinvolgimento delle fibre del sistema nervoso vegetativo configurando il quadro della neuropatia autonoma.

Il piede neuropatico può sviluppare lesioni nelle zone di conflitto con le calzature, come il dorso delle dita, i polpastrelli e le zone marginali. L'assenza di dolore è tipica di queste ulcere ed è il motivo per cui spesso non vengono segnalate al medico; restano misconosciute per lungo tempo spesso fino a quando non si infettano con lo sviluppo di un quadro clinico ben più grave.[2,3,4]

## 1.3.1 Il piede diabetico

Il piede diabetico è la complicanza cronica più comune, che dipende principalmente dalla durata e dal successo del trattamento del diabete mellito. Sulla base di studi epidemiologici, si stima che il 25% delle persone con diabete mellito svilupperà i problemi con piede diabetico durante la vita, mentre tra il 5% e il 15% saranno trattati per l'amputazione del piede o della gamba. [5]

Il termine piede diabetico indica un'alterazione del sistema osteo-muscolo-cutaneo dell'arto inferiore, precisamente del piede, provocata da complicanze croniche. Questo indica quindi uno stato morboso che si sviluppa come deterioramento della funzione sensoriale e dell'irrorazione sanguigna degli arti inferiori. [6]

Si fa riferimento alla neuropatia diabetica o l'arteriopatia degli arti inferiori che hanno il fine di compromettere la funzionalità o la struttura del piede. [2,6]

I due quadri sono profondamente diversi tra loro: tuttavia nella gran parte dei soggetti, soprattutto di età avanzata, coesiste sia la neuropatia che la vasculopatia e si parla quindi di piede neuro ischemico.

Questi scompensi portano all'alterazione della biomeccanica della normale deambulazione e spesso alla formazione di callosità o, come effetto finale, all'ulcerazione che, se non curata, può causare l'amputazione.

Il punto cruciale dell'insorgere del "piede diabetico" è sempre stato considerato come il risultato della presenza di vasculopatie periferiche, neuropatie periferiche o infezioni (in figura 1). [4]



*Figura 1– Possibili infezioni del piede diabetico.*

<https://www.formativezone.it/il-piede-diabetico-prevenzione-diagnosi-e-terapia/>

In uno studio precedentemente analizzato si è riscontrato che le ulcere del piede hanno maggiori probabilità di essere di origine neuropatica e quindi eminentemente prevenibili; soprattutto nei paesi in via di sviluppo, in cui la percentuale di pazienti affetti da diabete di tipo due è in aumento. [7]

Più recentemente si è riscontrata l'implicazione di altre cause, come ad esempio fattori psicosociali, anormalità delle pressioni plantari o dei carichi di reazione al suolo. [7]

L'ulcerazione, come risultato finale di un processo che ha portato alla variazione della normale funzionalità del piede, raramente è causata da una singola di queste patologie, ma dall'interazione di due o più di esse. [5,6]

## Capitolo 2

# ANALISI POSTUROGRAFICA

La postura umana è costituita dalla sovrapposizione di più "moduli" dal suolo alla testa. Ogni modulo, legato al successivo dai muscoli, ha una sua propria regolazione centrale e riflessa che gli permette di mantenere la sua posizione con particolari rapporti tra i diversi segmenti corporei. [8]

In condizione eretta si paragona il corpo umano ad un pendolo invertito che può essere, essendo per sua natura instabile, soggetto ad oscillazioni, soprattutto nel piano sagittale, di circa quattro gradi attorno alla caviglia. L'equilibrio viene mantenuto fino a quando il centro di gravità cade all'interno del poligono di sostegno ovvero l'area di appoggio definita dalla pianta dei piedi. [9]

L'obiettivo principale del controllo posturale consiste nel far mantenere al soggetto una postura che garantisca la base dei movimenti volontari e il mantenimento dell'equilibrio. A proposito del mantenimento della postura, questa necessita di movimenti compensatori elaborati automaticamente tramite archi riflessi sotto il controllo tronco-cerebellare e dipende da informazioni elaborate da afferenze sensoriali:

- Esterocettori e propriocettori muscolari, adibiti alla rilevazione di lunghezza e tensione muscolari;
- Recettori vestibolari, che hanno il compito di percepire le inclinazioni corporee sulla base del movimento della testa;
- Afferenze visive, che trasmettono informazioni di movimento del campo visivo;[9]

Mediante questi recettori il soggetto riesce a mantenere la posizione in equilibrio, avrà il centro di gravità all'interno del poligono di sostegno, sia quando deambula che quando è fermo. [11,12]

Bisogna anche sottolineare che le informazioni tratte da 3 afferenze sono ridondanti e quindi il mantenimento della postura è garantito, anche se ci dovessero essere mancanza o deficit nelle informazioni da uno dei tre canali. [1]

La base di appoggio è costituita dai piedi posti in posizione trocanterica (al di sotto dell'articolazione dell'anca).[13]

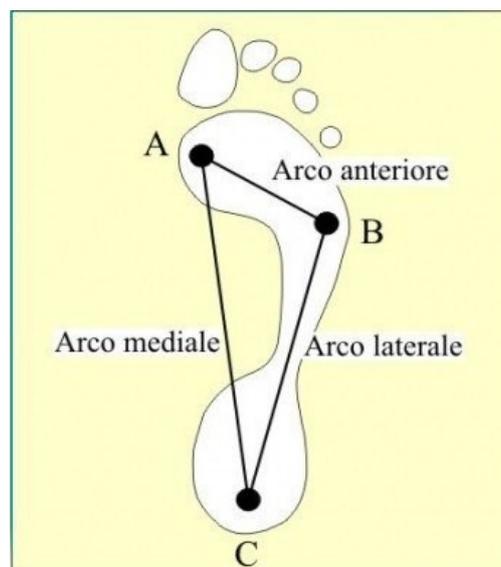
Ogni piede poggia su 3 punti di appoggio:

- Tuberosità del calcagno
- Base del primo metatarso
- Base del quinto metatarso

Le linee che uniscono i 3 punti d'appoggio sono gli archi plantari con il quale ricaviamo sostegno in contrapposizione alla forza gravitazionale.

I tre archi (figura 2) sono:

- Arco plantare mediale (dalla tuberosità del calcagno al primo metatarso)
- Arco plantare laterale (dalla tuberosità del calcagno al quinto metatarso)
- Arco plantare trasverso (dal primo al quinto metatarso) [13]



*Figura 2– Posizione archi nella pianta del piede:*

*arco anteriore (AB), arco laterale (BC), arco mediale (CA)*

*<https://www.posturafacile.it/2013/03/test-romberg-posturale/>*

La stabilometria, meglio conosciuta come posturografia, è l'osservazione o misurazione di una avvenuta stabilizzazione contro la gravità ed eventuali perturbazioni che siano esterni o interni rispetto il soggetto che stiamo valutando. [14]

Esistono due tipi di posturografia:

- **STATICA:** valuta in maniera qualitativa l'oscillazione posturale, attraverso l'utilizzo di una piattaforma di forza fissa, che misura tre componenti della reazione vincolare al terreno ed il movimento rispetto ai tre assi per un soggetto che si trovi fermo in posizione eretta sopra di essa. Questa posizione viene chiamata quiet standing. [14]

Nella stabilometria statica ci sono diversi test complementari che possono essere proposti allo scopo di valutare in maniera più specifica l'interferenza dei fattori sull'analisi posturografica. Per il presente studio il più interessante è il ruolo dell'informazione visiva: viene valutata, in funzione dello studio dell'interferenza visiva, la chiusura degli occhi.

- **DINAMICA:** valuta una postura spontanea che viene perturbata da stimoli esterni imprevisti con lo scopo di valutare il contributo apportato dai canali visivo, vestibolare e somato-sensoriale oltre al recupero della postura iniziale. Mediante questa tecnica è possibile studiare il controllo degli adeguamenti posturali alle variazioni della base di appoggio e consentire di trarre informazioni rispetto le strategie usate dal paziente per mantenere la stazione eretta in situazione perturbate.[14]

Sia nella dinamica che nella statica posturale si parla di diversi standard che servono principalmente per effettuare una valutazione:

- Centro di massa (CoM), ovvero il centro geometrico di tutti elementi di massa che compongono il corpo;
- Centro di gravità (CoG), ovvero la proiezioni del CoM sul terreno;
- Centro di pressione (CoP), ovvero il centro geometrico delle pressioni applicate sotto la base di appoggio, la posizione del punto di applicazione della risultante della forze scambiate tra base di appoggio e il mondo esterno; nel caso di un corpo fermo rispetto ad un sistema di riferimento inerziale il CoG coincide con il CoP.

Per la valutazione clinica della postura, la prova stabilometrica può venire eseguita in differenti condizioni. La condizione sperimentale più frequente si effettua ad:

- occhi aperti e chiusi in appoggio sulla pedana (superficie rigida).

Meno frequentemente si possono svolgere test nelle seguenti condizioni:

- occhi aperti e chiusi in appoggio tra piedi e pedana su di un materiale che permette di valutare, grazie alle sue specifiche proprietà, l'informazione propriocettiva sotto le piante dei piedi;

- con capo retroflesso ed eventualmente anche antero-flesso o ruotato;

- con capo retto ma posizionando dei rulli di cotone tra le arcate dentarie in modo da determinare lo svincolo dell'articolazione temporomandibolare.[14]

La combinazione delle differenti registrazioni consente di ricavare informazioni precise su come differenti sistemi costituiti dal labirinto, dalla vista, dalla propiocezione, dai meccanorecettori si integrino nel controllo della stazione eretta.[11]

Quindi l'esame posturografico o stabilometrico permette di valutare le condizioni di equilibrio studiando la posizione e la dinamica della proiezione a terra. In sintesi questo tipo di esame non misura l'equilibrio in senso letterale, ma la capacità del sistema umano nel mantenere una posizione eretta equilibrata. Grazie all'acquisizione istantanea di informazioni esterne da parte del nostro organismo, l'uomo riesce a mantenere l'equilibrio, mediante l'apparato oculo-motore conosciuto come vista, l'apparato vestibolare detto udito, l'apparato propriocettivo ovvero muscoli e recettori specifici che determinano le correzioni necessarie a compensare le perturbazioni sull'equilibrio provenienti dall'ambiente esterno. [11,14]

Per effettuare l'analisi strumentale di un test posturografico si può ricorrere a due tipologie di soluzioni tecnologiche:

- la pedana di forza, in questo caso il corpo mantiene la stazione eretta grazie alla combinazione di forze interne, determinate dall'azione dei muscoli, e di forze esterne, scambiate dal corpo con l'ambiente. Queste pedane rilevano carichi di reazione al suolo (che secondo la terza legge del moto di Newton sono uguali in ampiezza e opposti in direzione rispetto alle forze applicate sulla piattaforma) tramite dei trasduttori di forza che subiscono delle deformazioni meccaniche proporzionali alle intensità delle forze in gioco. Il punto dell'applicazione della forza è detto centro di pressione CoP poiché rappresenta il centro della distribuzione di pressione sulla superficie di appoggio del piede;

- la pedana barometrica, con questo strumento è importante conoscere la distribuzione dei carichi sulla base di d'appoggio costituita dai piedi. La grandezza misurata da una pedana baropodometrica è infatti la distribuzione di pressione e data la relazione esistente tra pressione e forza è possibile conoscere la forza verticale applicata. Molto frequentemente si misura la forza e la pressione viene derivata tramite l'area attiva del sensore.

In entrambi i casi l'analisi è non invasiva.[1,15]

## 2.1 Centro di Pressione CoP

Quando si misura l'equilibrio, le variabili più utilizzate per descrivere tale stato sono il CoP (figura 3b) e le forze generate in relazione al centro di massa CoM (figura 4).

Il CoP risulta la variabile più comunemente utilizzata quando si parla di valutazione dell'equilibrio. L'idea di utilizzare il CoP come misura di riferimento risulta particolarmente efficace quando si adotta anche il modello del pendolo inverso per descrivere il movimento eseguito dal corpo per ritornare ad uno stato di equilibrio. Esiste un costante di spostamento fra la posizione del CoP e CoM regolata da una legge matematica. [15]



*Figura 3 a*

*Figura 3a- Forze che agiscono sulla base d'appoggio.*



*Figura 3 b*

*Figura 3b- Centro di pressione.*

*Tecnologie per la riabilitazione, università degli studi di Napoli 2005*



*Figura 4- Centro di massa*

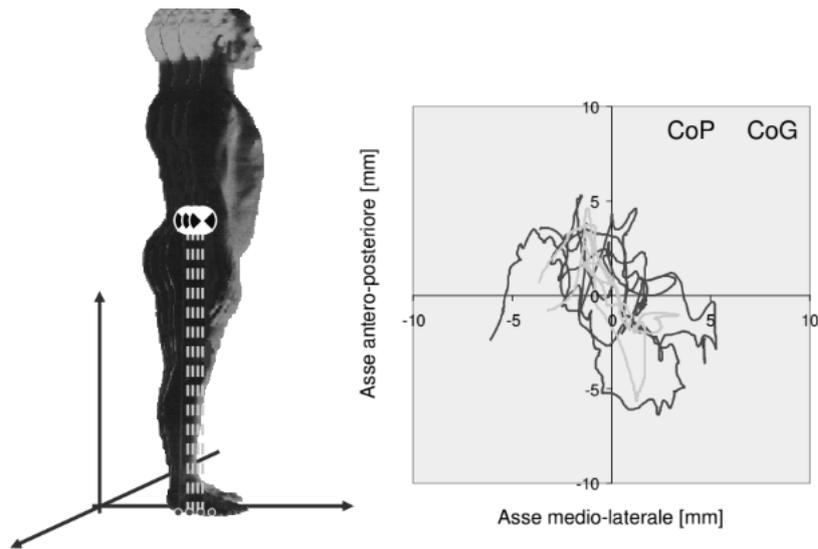
*Lezione 9, Prof. Aurelio Capozzo, Tecnologie per la riabilitazione, università degli studi di Napoli 2005*

In letteratura troviamo molti studi che sfruttano le misure COP per la valutazione della postura: per esempio lo studio di Chiari et al [1] in cui il COP è stato utilizzato per classificare i soggetti sani rispetto strategie visive per il controllo posturale, oppure lo studio di Baratto et al [16] dove sono stati analizzati i valori COP per studiare la postura di tre popolazioni che differivano per le condizioni cliniche (normale, parkinsoniana e osteoporotica). Infatti, ad oggi, la misura COP è considerata un gold standard nell'analisi posturografica strumentale.[1,12,16,15]

Quando si appoggia un piede al suolo, l'area di contatto con il terreno è sottoposta ad un sistema di forze distribuite sull'intera zona di contatto (come in figura 3a). Se al posto del suolo poniamo una piattaforma di forza è possibile valutare la forza scambiata tra il piede e la superficie di appoggio. [12,15]

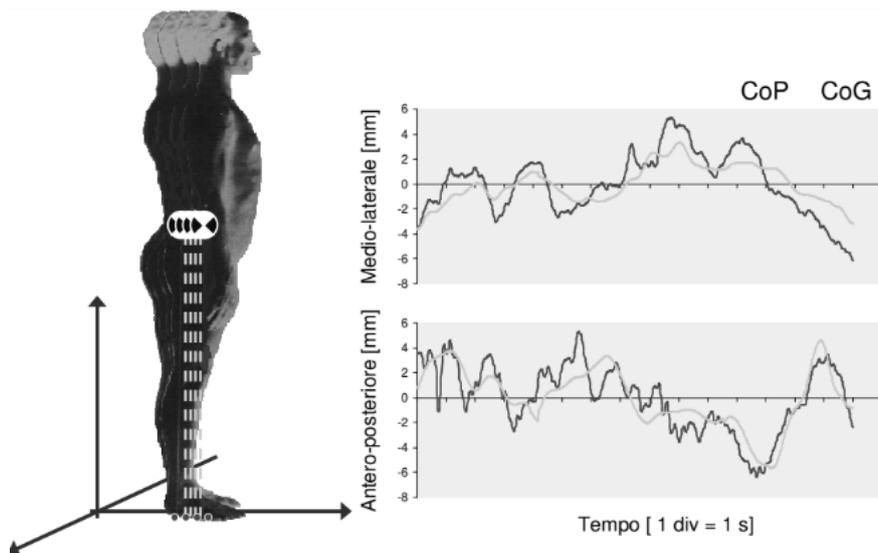
Per misurare le forze di contatto si possono ottenere due tipi di grafici:

- Statochinesiogramma: rappresenta lo spostamento delle coordinate del centro di pressione nel piano orizzontale (figura 5);



*Figura 5- Statochinesiogramma: spostamento delle coordinate del Cop di un soggetto. Lezione 9, Prof. Aurelio Capozzo, Tecnologie per la riabilitazione, università degli studi di Napoli 2005*

- Stabilogramma: rappresenta graficamente lo spostamento di ciascuna componente del centro di pressione in funzione del tempo;[15]



*Figura 6- Stabilogramma: spostamento delle componenti del COP in funzione del tempo. Lezione 9, Prof. Aurelio Capozzo, Tecnologie per la riabilitazione, università degli studi di Napoli 2005*

Nello studio di Baratto et al [16] si indica che il ruolo del COP è preponderante nell'analisi della posturografia, sia statica che dinamica.

Per la prima i soggetti rimangono in stazione eretta su una superficie piana, orizzontale, in assenza di perturbazioni esterne con occhi aperti e chiusi e i movimenti spontanei di

oscillazione sono tipicamente registrati attraverso la traiettoria del centro di pressione sul piano di appoggio.

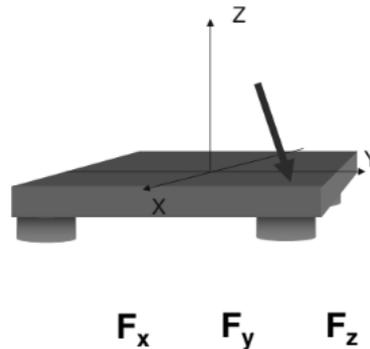
La traiettoria del CoP può essere parametrizzata con diverse tecniche.

Nel paradigma dinamico la postura spontanea è perturbata per mezzo di diversi stimoli imprevedibili al fine di valutare il contributo del sistema visivo, vestibolare e i canali somato-sensoriali nel recupero della postura iniziale.

Nel caso statico quindi la principale fonte di disturbo è connessa all'instabilità del corpo intrinsecamente presente nel pendolo invertito quindi è un disturbo interno; mentre nelle condizioni dinamiche il disturbo è imprevedibile e la risposta viene indicata come un insieme di riflessi. [16]

## 2.1.1 Andamento temporale della posizione del CoP

Per comprendere meglio come utilizzare le misure delle traiettorie CoP nella posturografia bisogna avvalersi delle pedane di forza (figura 7).



*Figura 7-Pedana di forza e scomposizione di una forza sui tre assi.*

*Lezione 9, Prof. Aurelio Capozzo, Tecnologie per la riabilitazione, università degli studi di Napoli 2005*

La pedana di forza può essere usata in vari ambiti come lo studio delle posture, movimenti sportivi, diagnostica e riabilitazione.[9]

Per un utilizzo ottimale necessita di un ancoraggio al terreno perché i suoi spostamenti durante il test determinerebbero degli errori nelle misure. Come detto precedentemente, le pedane di forza misurano le forze di reazione piede-suolo grazie alle celle di carico costituite da estensimetri resistivi o cristalli piezoelettrici.

Le pedane di forze ad estensimetri hanno quattro celle di carico. Questi estensimetri sono in grado di variare la propria resistenza in funzione della deformazione a cui sono sottoposti e quindi permettono di estrapolare il valore della forza esercitata e causa della deformazione stessa. La particolarità degli estensimetri quindi è proprio quella di non avere una elettronica dedicata per le misure, ma solo di una amplificazione del segnale e di una alimentazione elettrica.

Note quindi le forze agenti su ciascuna cella e la posizione geometrica delle celle è possibile poi ricavare le coordinate CoP attraverso l'equilibrio dei momenti.

Le pedane di forza piezoelettriche hanno celle di carico contenenti un cristallo piezoelettrico. L'effetto piezoelettrico è presente in quasi tutti i materiali cristallini che

sono privi di centro di simmetria. La struttura di quest'ultimi è costituita da dipoli microscopici elettrici.

In condizioni di quiete, i dipoli elettrici sono disposti nelle facce del cristallo per avere lo stesso potenziale elettrico.

Il suo funzionamento si basa sull'applicazione di una forza esterna che comprime il cristallo, quest'ultimo viene deformato e si perde la condizione di neutralità elettrica del materiale, per cui una faccia del cristallo è negativa mentre l'altra è positiva. Analizzando il comportamento, quindi, dei cristalli potremmo paragonarli a un condensatore sottoposto a una differenza di potenziale; andandolo a collegare a un circuito vedremo produrre una corrente elettrica chiamata piezoelettrica.

Questa corrente piezoelettrica sarà proprio il segnale elettrico di cui parlavamo sopra, che poi verrà digitalizzato per estrarre il valore della forza.

Se la forza applicata non varia, i cristalli non producono corrente mentre per gli estensimetri se vi è uscita nulla ci sarà lo stesso carico, costante nel tempo. In questo caso, per le pedane piezoelettriche, avremo bisogno di una elettronica di integrazione che diventa meno affidabile nel tempo e commette errori statici. Ma vengono considerate ottime per la valutazione di misure dinamiche come la corsa o impatti ad alta velocità.

Una volta eseguita e conclusa la prova posturografica mediante pedana avremo a disposizione tre componenti di forza (come in figura 7) in direzione verticale, antero-posteriore e medio laterale e le coordinate del COP; poiché questo test è effettuato in un arco di tempo, di tali grandezze avremo l'informazione nel tempo.

Successivamente si procede poi all'analisi dell'andamento delle posizioni del CoP attraverso stabilogramma o statochinesiogramma (riferimento paragrafo 2.1).

- Lo statochinegramma (in figura 8) si ottiene rappresentando le coordinate antero-posteriori del CoP in funzione delle sue coordinate medio-laterali e rappresenta il percorso effettuato dal CoP sulla superficie di appoggio nel corso della prova. Tramite questo tipo di rappresentazione è possibile misurare l'ampiezza delle oscillazioni del soggetto.[15]

Per individuare quantitativamente la posizione del centro di pressione devo ricorrere ad altri parametri che possono essere estratti dal gomitolo.

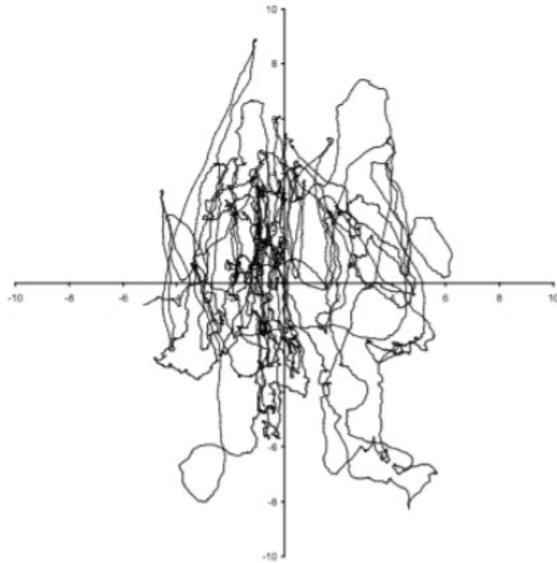


Figura 8-Statochinesiogramma [15].

Alcuni di essi sono:

- Distanza massima, cioè il massimo discostamento del CoP dalla sua posizione media. Questo parametro è sicuramente il più intuitivo per quantificare l'ampiezza delle oscillazioni. Ha un limite però: è una misura puntuale quindi affetta da errore casuale maggiore.
- Distanza RMS (root mean square), cioè il valore RMS (*formula 1*) del discostamento del CoP dalla sua posizione media durante la prova .

$$\text{distanza RMS} = \sqrt{1/N \sum (RD[n])^2} \quad [\text{Formula 1}]$$

con:

N=numero dei campioni CoP raccolte durante la prova;

$$RD[n] = \sqrt{AP[n]^2 + ML[n]^2} \quad [\text{formula 2}]$$

ML[n] è la distanza medio-laterale al campione n del CoP e la posizione media del CoP;

AP[n] è la distanza antero-posteriore dal campione n del CoP e la posizione media del CoP.

- Convex Hull che consiste nell'area del poligono convesso che racchiude tutti i punti del gomito.

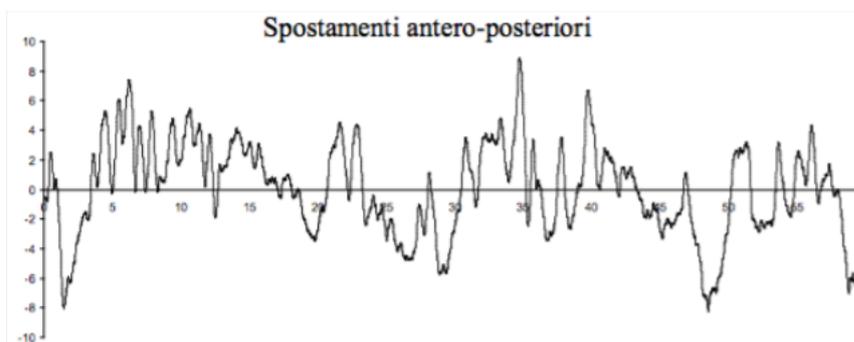
- Velocità media (*formula 3*) dello spostamento del CoP, data dal rapporto tra la lunghezza del percorso compiuto dal CoP e l'intervallo di tempo durante il quale questo percorso è stato compiuto.

$$Velocità = (\sum_{n=1}^{N-1} \sqrt{(AP[n+1] - AP[n])^2 + (ML[n+1] - ML[n])^2}) / T$$

*[formula 3]*

In sintesi possiamo definire lo statochinesiogramma e i suoi parametri estratti come un ottimo strumento per ottenere informazioni utili sulla capacità del paziente di mantenere l'equilibrio ma non dà informazioni riguardo l'evoluzione temporale delle oscillazioni. [1,15]

- Lo stabilogramma (in figura 9) si utilizza per valutare l'ampiezza delle oscillazioni nel tempo ricorrendo alla definizioni di alcuni parametri.[15]



*Figura 9-Stabilogramma-spostamenti anteroposteriori.[15]*

Alcuni parametri sono:

- Lunghezza del gomito, rappresenta il percorso globale del centro di pressione sulla pedana.
- Superficie ellisse, indica l'area in cm<sup>2</sup> che contiene il 90% dei punti del gomito.
- X medio e Y medio, che sono i valori medi delle oscillazioni in direzione medio-laterale e antero-posteriore e del CoP.
- Rapporto L/S, viene indicata come la funzione di correlazione tra la lunghezza del gomito e la superficie dell'ellisse. È considerato un indice dell'energia spesa dal sistema ed in condizioni di normalità il suo valore si aggira intorno all'uno. [1,15]

In questo ambito si può introdurre anche la tecnica della trasformata di Fourier (FFT, fast fourier transformer) che è una tipologia di analisi svolta su serie temporali per estrarre i parametri. In questo caso la FFT serve per rappresentare l'oscillazione

del centro di pressione come una funzione non periodica e limitata nel tempo. Vengono valutate separatamente le oscillazioni sul piano frontale e sul piano sagittale. La frequenza normale delle oscillazioni del corpo umano varia tra 0.02 Hz e 0.04 Hz. Questa frequenza fondamentale rappresenta l'offset del sistema posturale statico. È con questa frequenza che il sistema rileva le afferenze visive, propriocettive, vestibolari e determina le dovute correzioni posturali sulle grandezze rilevate. Ritrovare, quindi componenti superiori a questi valori significa che il sistema posturale è alterato.

## 2.2 Ruolo del feedback visivo nel mantenimento della postura

La vista ha un ruolo fondamentale nella postura e nel mantenimento dell'equilibrio.[1,10]

Focalizzare lo sguardo su un target fisso mentre si sta in piedi aiuta a mantenere la posizione eretta e a minimizzare le oscillazioni del corpo oltre ad aumentare la stabilità nella postura. L'efficacia della stabilizzazione visiva dipende da molti fattori tra cui possiamo citare la dimensione e la posizione del target oltre alla distanza di sguardo. [1]

A occhi aperti, le oscillazioni laterali del capo non superano qualche millimetro, mentre ad occhi chiusi aumentano in ampiezza ma anche in frequenza. [10,12,14]

L'ingresso visivo del sistema posturale è facilmente manipolabile: basta ad esempio, chiudere le palpebre per variare le informazioni visive. Grazie alla sua semplicità, dal punto di vista clinico, chiudere gli occhi è preferibile a tutti gli altri metodi che si potrebbero utilizzare per valutare l'input visivo nella posturografia.

Connesso al concetto dell'importanza del feedback visivo, utilizzando piattaforme stabilometriche, uno dei parametri più sensibili all'effetto dell'informazione visiva nel mantenimento della postura statica è l'area dell'ellisse di confidenza. Quest'ultimo contiene il 95% delle posizioni del centro di pressione campionate rilevate e in assenza di informazioni del sistema visivo, si rileva una ridotta efficienza del controllo posturale. Nella pratica clinica questo parametro viene chiamato quoziente di Romberg. [1]

## 2.3 Quoziente di Romberg e la sua correlazione con il PDS

Durante un test strumentale di postura è possibile rilevare il quoziente o l'indice di Romberg, che ci permette di conoscere l'influenza della vista nel controllo della postura nel soggetto in esame.

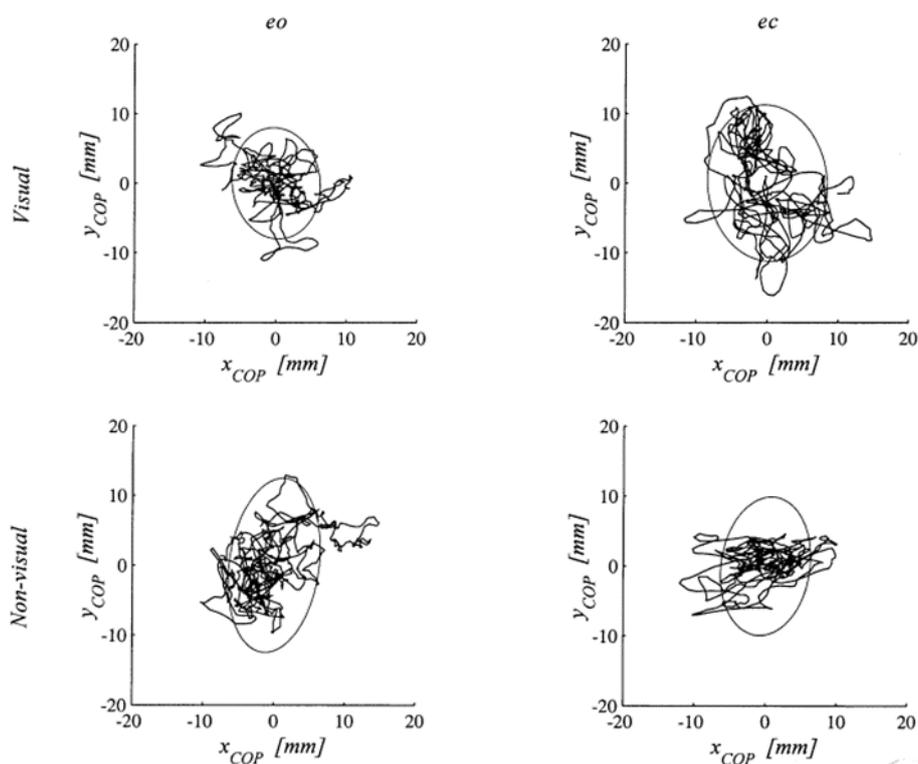


Figura 10- Andamento temporale tipico delle due componenti della COP: mediolaterale ( $x_{COP}$ ) e antero-posteriore ( $y_{COP}$ ).

<https://www.posturafacile.it/2013/03/test-romberg-posturale/>

L'indice di Romberg (*formula 4*) è il risultato del rapporto tra il valore del COP misurato a occhi chiusi e il valore del COP misurato a occhi aperti (come in figura 10).

$$RQ = \frac{COP \text{ occhi chiusi}}{COP \text{ occhi aperti}} \text{ [formula 4]}$$

Per valutare l'oscillazione posturale bisogna stimare questo indice:

- Se è maggiore di 1, implica che il soggetto oscilla di più a occhi chiusi;
- Se è minore di 1, implica che il soggetto oscilla di più a occhi aperti.

Valori in esame elevati di questo indice indicano delle problematiche come quelle propriocettive/ vestibolari, mentre valori bassi indicano soggetti definiti ciechi posturali ossia la prevalenza dei fattori propriocettivi su quelli visivi e/o disturbi della vista o della mobilità oculare negli adulti. [1]

Questo tipo di indice risulta propedeutico per definire e ricavare il PDS (*formula 5*), percentage difference of sway, che tiene conto della distribuzione bimodale nei dati:

$$PDS = \frac{RQ-1}{RQ+1} 100 \quad [Formula 5]$$

Se il valore di questo indice è vicino allo zero o negativo allora indicherà un'entità dell'oscillazione del corpo maggiore ad occhi aperti.

Se il valore di questo indice è positivo allora avremo un'oscillazione maggiore a occhi chiusi.[1,14]

## Capitolo 3

# MODALITA' DI ESECUZIONE DELLA PROVA

## 3.1 I soggetti considerati

Sono state testate tre popolazioni (in figura 11):

- La prima popolazione di 60 soggetti diabetici non neuropatici (DNN);
- La seconda popolazione di 40 soggetti diabetici neuropatici asintomatici (DNA);
- La terza popolazione di 100 soggetti diabetici neuropatici sintomatici (DNS);

Per un totale di 200 soggetti analizzati.

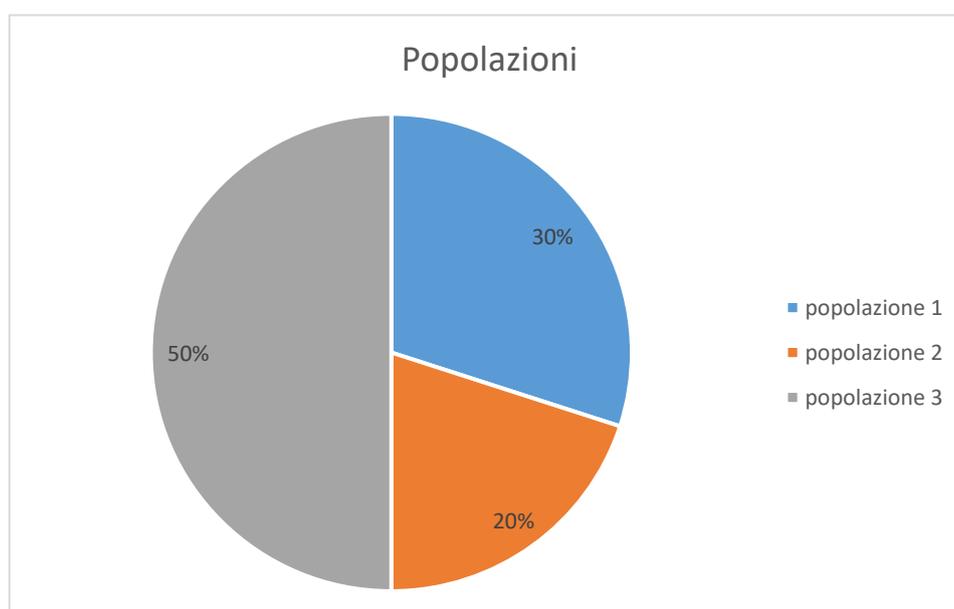


Figura 11- Composizione della popolazione dello studio.

## 3.2 Protocollo di misura

I dati sono stati raccolti da uno studio sperimentale documentato nell'articolo di Fioretti et al.[17]

Il protocollo di misura consisteva nello stare a piedi nudi su una piattaforma dinamometrica.

Per ridurre al minimo il disagio del soggetto durante tutta la sessione sperimentale, la larghezza della base di appoggio è stata mantenuta all'incirca uguale alla larghezza del bacino del soggetto. Al fine di ridurre la variabilità delle misure COP, oltre a mantenere la durata della prova entro tempi ragionevoli, ogni test è stato eseguito due volte con gli occhi aperti (OA) e due volte con gli occhi chiusi (OC); ogni coppia di punti presi ottenuta nella stessa condizione visiva è stata poi mediata, ovvero è stata eseguita una media temporale. I piedi sono stati posizionati allo stesso modo in tutte le prove. Durante la misurazione ad occhi aperti i soggetti dovevano guardare un bersaglio visivo posto a 3 metri davanti a loro e posto all'altezza degli occhi. Sono stati registrati anche i dati antropometrici con particolare attenzione all'altezza, alla massa, all'area della base di appoggio, alla larghezza massima del piede e l'angolo di apertura del piede. Per ogni prova, i dati della piattaforma di forza sono stati acquisiti per 60 secondi ad una frequenza di campionamento di 100 Hz. Le coordinate COP antero-posteriori (AP) e medio-laterale (ML) sono state filtrate con una frequenza di cut off di 5 Hz da un filtro di Butterworth passa-basso del quarto ordine.[17]

## 3.2.1 Piattaforma dinamometrica

La piattaforma dinamometrica utilizzata in questo test è del tipo Kistler modello 9281E come in figura 12, appartenente alla famiglia delle pedane con sensori piezoelettrici.



*Figura 12 – Piattaforma Kistler 9281E.*

*<https://www.kistler.com/it/soluzioni/prove-in-ricerca-e-sviluppo/biomeccanica-e-pedana-di-forza/>*

Questa pedana di forza multicomponente ha un ampio campo di misurazione.

Ha la possibilità di rilevare le forze di reazione al suolo, momenti e centro di pressione nella biomeccanica.

Il campo di misura è estremamente ampio con un'eccellente precisione di misurazione, oltre a un'alta frequenza naturale.

La pedana di forza multicomponente Tipo 9281E è composta da una piastra superiore a sandwich in alluminio di 600x400 mm.

È di avanzata costruzione, definita leggera pur avendo quattro sensori piezoelettrici nei 4 lati.

È estremamente rigida nel complesso.

Grazie alle speciali proprietà dei sensori piezoelettrici, la piastra è altamente sensibile e può misurare contemporaneamente fenomeni molto dinamici coinvolti in una vasta gamma di applicazioni.

Questa pedana di forza è progettata specificamente per l'uso nella ricerca di base sportiva. Ha un range che misura da  $-10$  kN a  $20$  kN .[18]

# Capitolo 4

## ELABORAZIONE DATI

### 4.1 Clustering

Le tecniche di clustering sono metodi “non supervisionati” che hanno l’obiettivo di organizzare dati in gruppi in base alle somiglianze tra i singoli elementi.

Le potenzialità degli algoritmi di clusterizzazione sono sfruttabili in molti ambiti come l’elaborazione di immagini, riconoscimento di modelli, la modellazione e identificazione oltre alla classica classificazione. [20]

Lo scopo del clustering è identificare raggruppamenti naturali di dati da un ampio data set per produrre una rappresentazione concisa del comportamento del sistema. Nel clustering è fondamentale la definizione di una metrica; quest’ultima risulta essere ben posta quando gli attributi delle osservazioni sono numerici (in quanto è semplice definire una misura), mentre con attributi categorici risulta più complessa.

È possibile dare diverse definizioni di un cluster, a seconda delle finalità che avrà l’algoritmo. In generale la definizione che più viene utilizzata è sicuramente quella data dall’articolo di Bezdek et al [20] , e ripresa dall’articolo di Jain e Dubes [21] in cui si afferma che un cluster è un gruppo di oggetti che sono simili tra loro più che ad altri oggetti appartenenti a diversi cluster.

L’implementazione degli algoritmi viene influenzata non solo dalla forma geometrica dei cluster ma anche dalle loro relazioni spaziali e dalle distanze; poiché i clusters possono essere ben separati tra loro, oppure collegati.

La cluster analysis è infatti un metodo puramente empirico di classificazione, e come tale, in primo luogo, una tecnica induttiva.

Quest’ultima ha un obiettivo ovvero identificare raggruppamenti omogenei di osservazioni tali per cui

- in ogni cluster le osservazioni siano simili tra loro,
- le osservazioni di cluster diversi siano tra loro dissimili,

con lo scopo di:

- fornire un'interpretazione del fenomeno
- realizzare suddivisioni preliminari (costruire modelli separati più aderenti alle esigenze)
- facilitare l'identificazione di outlier e fenomeni anomali, mediante l'osservazione di elementi spazialmente separati rispetto alle singole dimensioni
- identificare osservazioni di riferimento (prototipi), ovvero identificare i centroidi (che possono non avere una corrispondente osservazione reale).

I requisiti base per un ottimo algoritmo di clusterizzazione sono:

- Flessibilità: ammettere la presenza di attributi numerici e categorici;
- Robustezza: i cluster generati devono essere stabili a fronte di piccole variazioni del dataset;
- Efficienza: i tempi di elaborazione per la generazione dei cluster devono essere contenuti (in generale la costruzione della soluzione ottimale di cluster richiede un tempo esponenziale).

Possiamo parlare di distinzioni tra due tipologie di Algoritmi:

- I metodi di hard clustering si basano sulla teoria degli insiemi classica e richiedono che un oggetto appartenga o non appartenga a un cluster. Hard clustering significa partizionare i dati in un numero specificato di sottoinsiemi che si escludono a vicenda.
- I metodi di fuzzy clustering consentono agli oggetti di appartenere a più cluster contemporaneamente, con diversi gradi di appartenenza.  
Oggetti ai confini tra diverse classi non sono obbligate ad appartenere completamente a una delle classi, ma piuttosto vengono assegnati gradi di appartenenza compresi tra 0 e 1 che indicano la loro appartenenza parziale.

L'hard clustering viene individuato come la scelta opposta al fuzzy. Un esempio per comprendere meglio le loro differenze: se si dovesse clusterizzare un insieme di mele in base al loro colore, con l'hard clustering la mela potrebbe essere o solo rossa o solo verde, e non entrambe, cosa che garantisce il fuzzy.[26]

## 4.1.1 Fuzzy Clustering

Il Fuzzy Clustering c-means (FCM), sviluppato da Jain e Dubes [21] e migliorato da Bezdek nel 1981 [20], definito come una forma di clustering tale per cui ogni punto può appartenere a più di un cluster.

Come detto, vi è molta differenza rispetto all'hard clustering, ma il fuzzy ha una funzionalità molto diffusa nella realtà poiché non sempre si può classificare un elemento solo in una "classe".[1]

Per comprendere meglio l'algoritmo fuzzy bisogna prima di tutto introdurre il partizionamento fuzzy e anche le tecniche di identificazione basate sul fuzzy clustering. È necessario dapprima indicare le partizioni rigide come un insieme di dati  $Z$  che poi vengono raggruppati in  $c$  cluster dette anche classi; quindi  $Z$  sarà definita come una famiglia di sottoinsiemi con caratteristiche comuni.

Mentre per una partizione fuzzy bisogna utilizzare come ragionamento la generalizzazione della partizione hard: si permette a una variabile di assumere qualsiasi valore reale all'interno dell'intervallo 0 e 1, così da non avere come valori solo 0 e 1 ma tutti quelli interni all'intervallo. [22]

Il concetto di partizione fuzzy è essenziale per l'analisi dei cluster e di conseguenza anche per le tecniche di identificazione basate sul fuzzy clustering.

L'implementazione di questo metodo di clustering implica diverse fasi:

1. Scelta di un numero di cluster .
2. Assegnazione di coefficienti in maniera casuale a ciascun punto dato per distinguere il grado di appartenenza ai diversi cluster.
3. Ripetizione delle istruzioni fino a quando l'algoritmo non è definito convergente (ovvero, la variazione dei coefficienti tra due iterazioni non è maggiore di epsilon, la soglia di sensibilità):

3.1 Calcolo il centroide (*formula 6*) per ogni cluster.

Ogni punto  $x$  ha un insieme di coefficienti che indicano il grado di appartenenza al  $k$ -esimo gruppo  $w_k$ . Con fuzzy c-means, il baricentro di un cluster è la media di tutti i punti, pesata per il loro grado di appartenenza al cluster, o, matematicamente,

$$c_k = \frac{\sum x w_k ((x)^m)}{\sum x w_k ((x)^m)} \quad [Formula 6]$$

dove  $m$  è l'iperparametro definito di 'fuzziness' che controlla quanto sarà sfocato il cluster. Per sfocatura si intende un confine non definito in termini di appartenenza e non appartenenza. Quindi più è alto l'iperparametro  $m$ , più sfocato sarà il confine del cluster.

3.2 Per ogni punto dato, la selezione dei coefficienti che indicano la massima appartenenza ai cluster. [22]

In sintesi, l'algoritmo Fuzzy ha lo scopo di partizionare una raccolta finita di  $n$  elementi  $x = \{x_1, \dots, x_n\}$  in una collezione di  $c$ -fuzzy cluster rispetto a un dato criterio.

Dato un insieme finito di dati, l'algoritmo restituisce un elenco di  $c$  centri di cluster  $C = \{c_1, \dots, c_c\}$  e una matrice di partizione  $W = w_{ij}$ ; quest'ultima appartiene all'intervallo  $[0,1]$  con  $i=1, \dots, n$  e  $j=1, \dots, c$  dove ogni elemento  $w_{ij}$ , indica il grado in cui l'elemento,  $x_i$ , appartiene al cluster  $c_j$ .

Infine, la FCM (fuzzy  $c$ -means clustering) mira a minimizzare una funzione oggetto.

La minimizzazione della funzione oggetto rappresenta, quindi, un'ottimizzazione non lineare del problema che può essere risolto utilizzando una varietà di metodi, che sia una minimizzazione iterativa oppure algoritmi genetici; il metodo più usato è sicuramente la semplice iterazione di Picard.

Una volta valutato il metodo con cui si sviluppa il fuzzy clustering, bisogna specificare alcuni parametri:

- Numero di cluster  $c$ , sarà proprio questo il parametro su cui dovremmo fare supposizioni non avendo informazioni a priori. Con questo parametro possiamo avere due approcci principali per determinarlo:
  1. Mediante misure di validità che valutano la bontà della partizione ottenuta;
  2. Mediante fusione o inserimento iterativo di cluster, quindi iniziando con un numero grande per poi ridurlo.
- Parametro di sfocatura ovvero l'esponente di ponderazione poiché influenza la sfocatura della partizione risultante.

Per l'interruzione dell'algoritmo FCM avremo il criterio di cessazione che indica quando la norma della differenza tra due iterazione successive è minore della soglia. [1, 22,23,25]

## 4.1.2 Metriche per valutare la clusterizzazione

Per valutare la bontà del clustering vengono definiti alcuni indici di valutazione:

- I coefficienti di silhouette, i quali misurano quanto bene ogni modello è classificato confrontando la dissomiglianza all'interno di un cluster e del successivo. Il coefficiente di silhouette tiene conto sia della separazione sia della coesione e viene calcolato per ogni osservazione del dataset, secondo il seguente algoritmo:

1. Si calcola la media delle distanze di osservazioni appartenenti al medesimo cluster, per ogni cluster;
2. Si calcola la media delle distanze di ogni osservazione del cluster  $C_f$  da osservazioni di altri cluster e se ne determina il minimo per ogni osservazione;
3. Il coefficiente di Silhouette è definito come:

$$\text{Silh}(x_i) = \frac{v_i - u_i}{\max(u_i, v_i)} \quad [\text{Formula 7}]$$

Dove  $u_i$  e  $v_i$  sono due elementi appartenenti a due cluster differenti, rispettivamente  $U_i$  e  $V_i$ .

Il coefficiente di silhouette varia tra -1 e 1.[1]

Si preferiscono valori di  $\text{silh}(x)$  alti, in quanto valori bassi ( $\text{silh} < 0$ ) significherebbero che osservazioni del cluster “aderiscono” meglio ad altri cluster invece del proprio, ovvero che il clustering finale è errato.

- Indice di coesione del singolo cluster definita come la somma delle distanze tra le coppie di osservazioni dello stesso cluster;
- Indice di separazione di una coppia di clusters ovvero la somma delle distanze tra coppie di osservazioni appartenenti a cluster differenti;
- Indice della separazione complessiva che definisce la somma degli indici di separazione per ogni coppia di cluster;
- Indice di coesione complessiva della partizione indica la somma delle coesioni di ogni cluster.

Esistono anche dei coefficienti per valutare il numero ottimale di cluster:

- CRITERIO RULE OF THUMB:  $\sqrt{K/M}$  [Formula 8].
- CRITERIO ELBOW: Si traccia il grafico della varianza spiegata (somma dei quadrati delle distanze delle osservazioni), vista come una funzione del numero di cluster e si osserva il punto in cui la curva ha il “gomito”.
- CRITERIO SILHOUETTE-BASED: Si sceglie il numero di cluster che massimizza il coefficiente di silhouette medio.
- XB: valuta la bontà della suddivisione.[1,21,25,26 ]

## Capitolo 5

### RISULTATI

Nella presente sezione si passano in rassegna i risultati ottenuti. In particolare sono stati analizzati i dati delle tre popolazioni in funzione dell'importanza del feedback visivo.

#### 5.1 Confronti, deduzioni e discussione dei dati

Per la prima popolazione, è stata utilizzata una coppia di valori COP per ciascun soggetto, corrispondenti alle due condizioni visive occhi aperti (OA) e occhi chiusi (OC), per calcolare il valore del quoziente di Romberg e in seguito il PDS.

Successivamente è stato iterato il medesimo procedimento anche per la seconda e la terza popolazione.

Un'importante considerazione va effettuata per la terza popolazione, la quale, diversamente dalle altre due, presenta alcuni soggetti con valori del quoziente di Romberg (*Tabella 1*) alti (in un range tra 7 e 16), indice di problematiche propriocettive e vestibolari (riferimento *paragrafo 2.3*).

*Tabella 1- Alcuni soggetti con valori del quoziente di Romberg alterati (DNS)*

NUMERO SOGGETTO	Quoziente di Romberg
76	15.29
94	7.18
95	16.48
96	11.15

Una volta ricavati i valori della differenza percentuale di oscillazione (PDS) è stata effettuata una clusterizzazione, per ottenere una valutazione dell'equilibrio posturale rispetto l'afferenza visiva, mediante il Fuzzy clustering, svolto su MATLAB 2021.

L'algoritmo FCM, che viene utilizzato nella seguente fase per trovare una classificazione dei soggetti sfruttando il concetto di cluster, ha due oggetti in INPUT e altrettanti in OUTPUT:

In input

- Il vettore Data ovvero il vettore dei PDS corrispondenti ad una popolazione;
- Il numero  $N_c$  che indica il numero di cluster che si vogliono ottenere.

In output

- La matrice Centers che contiene le coordinate dei centroidi;
- La matrice U, la quale indica la distanza dai centroidi. L'elemento  $U(i,j)$  indica il grado di appartenenza del j-esimo punto nell'i-esimo cluster.[1,21,23]

Un appunto importante va fatto sulla scelta del numero di cluster.

Nel paragrafo precedente sono stati illustrati diversi coefficienti per valutare il numero di cluster ottimale. In questo esperimento si è preferito utilizzare un approccio per 'tentativi' poiché la rappresentazione grafica era piuttosto chiara.

La prima prova è stata effettuata con  $N_c$  pari a 2.

Per i soggetti non neuropatici la distribuzione delle osservazione è risultata nelle due condizioni come riportato nella seguente figura:

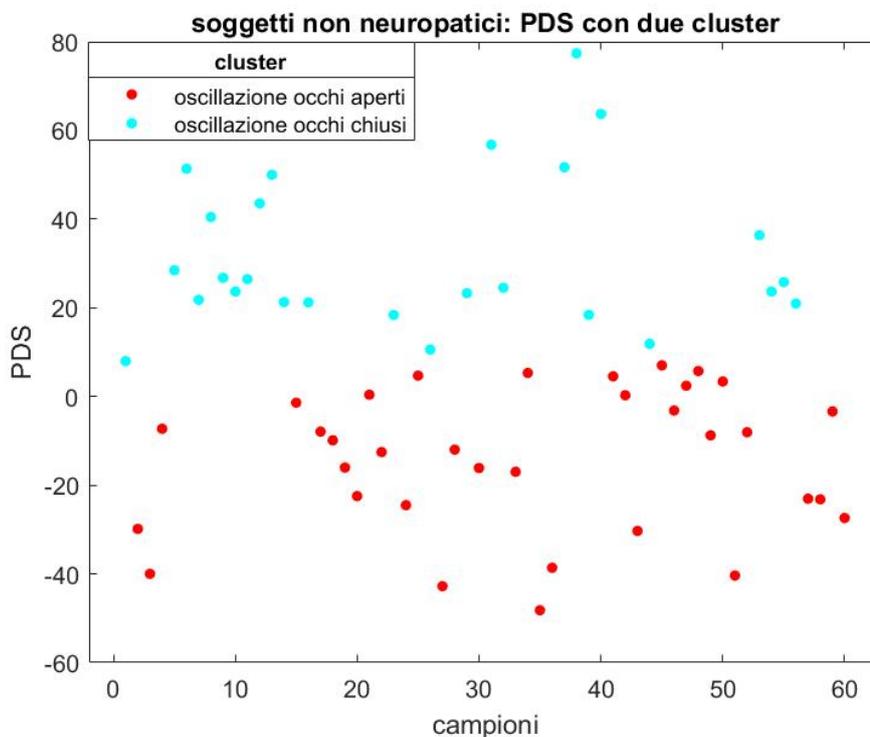
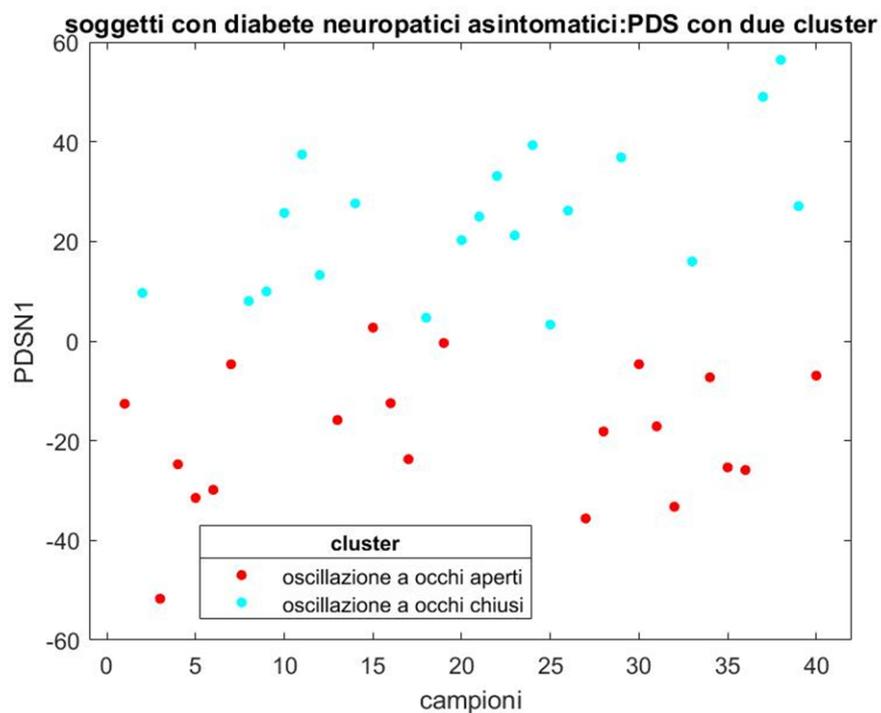


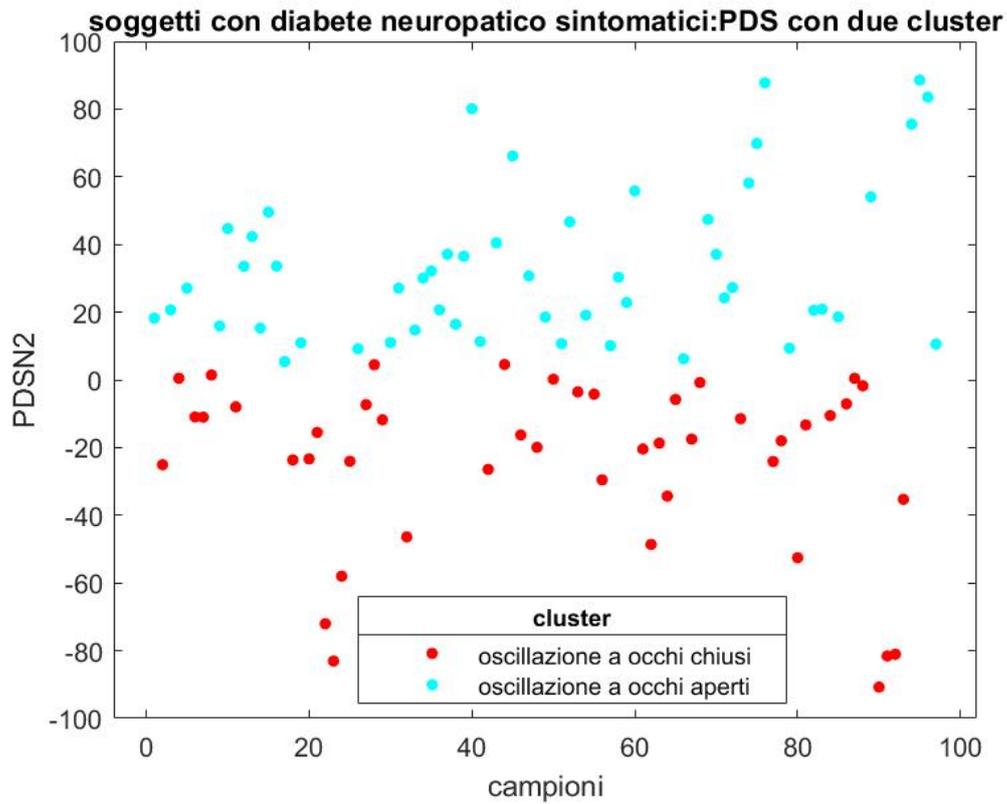
Figura 13– Diagramma FCM con due cluster.

Per i soggetti diabetici asintomatici ottenuta con due clusters è la seguente:



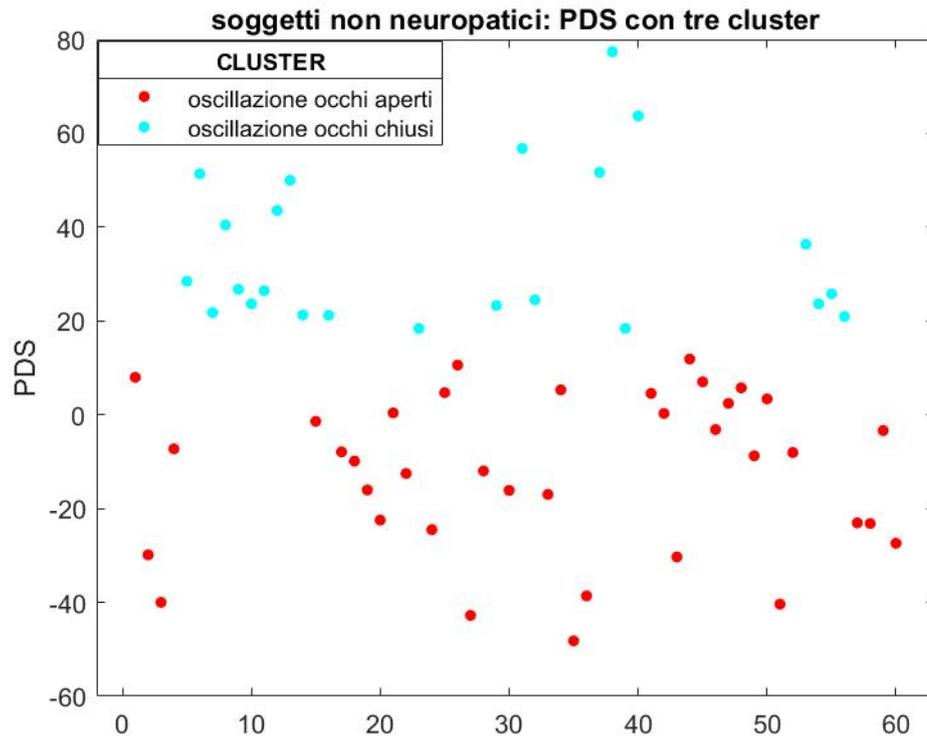
*Figura 14– Diagramma FCM con due cluster.*

Infine per i soggetti diabetici neuropatici con sintomi l'analisi con 2 clusters ha messo in evidenza quanto riportato in figura:

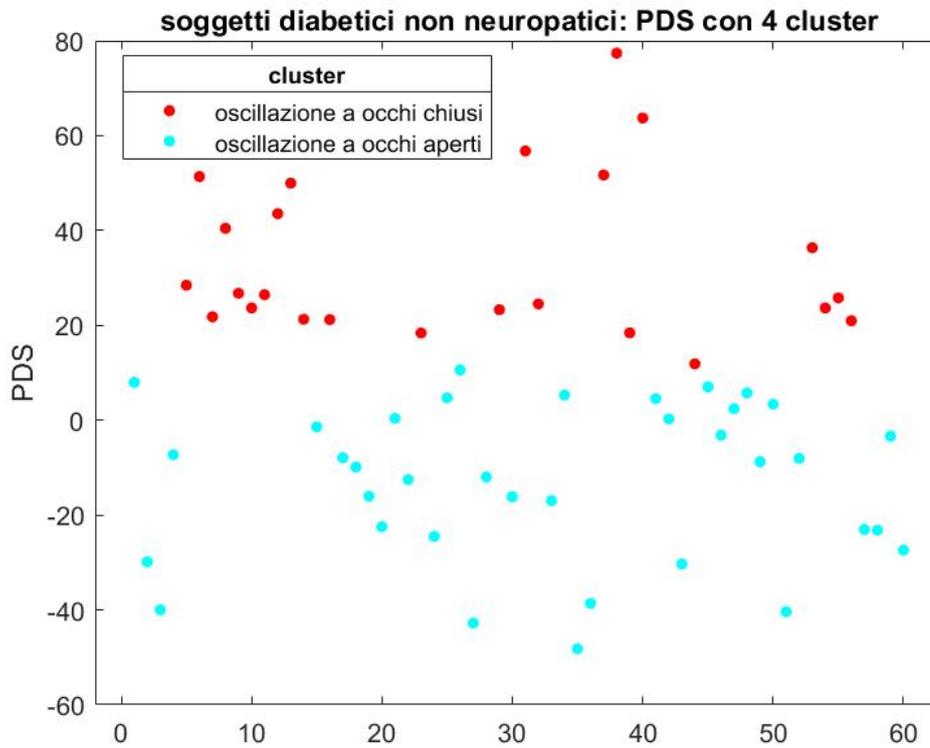


*Figura 15– Diagramma FCM con due cluster.*

In seguito, sono stati effettuati tentativi con un numero di Cluster pari a 3 e 4, solo per la prima popolazione, per valutare se il grafico desse maggiore precisione sulla suddivisione dei dati nei cluster.



*Figura 16– Diagramma FCM con tre cluster.*



*Figura 17– Diagramma FCM con quattro cluster.*

Si nota, in questo caso, che la rappresentazione è risultata identica, tra i diversi tentavi: i clusters effettivi utilizzati dalla funzione FCM sono risultati nuovamente 2, per entrambi i casi.

I due clusters identificano due classi, la prima con soggetti che oscillano maggiormente a occhi aperti (c1), mentre la seconda raggruppa soggetti che oscillano maggiormente a occhi chiusi (c2).

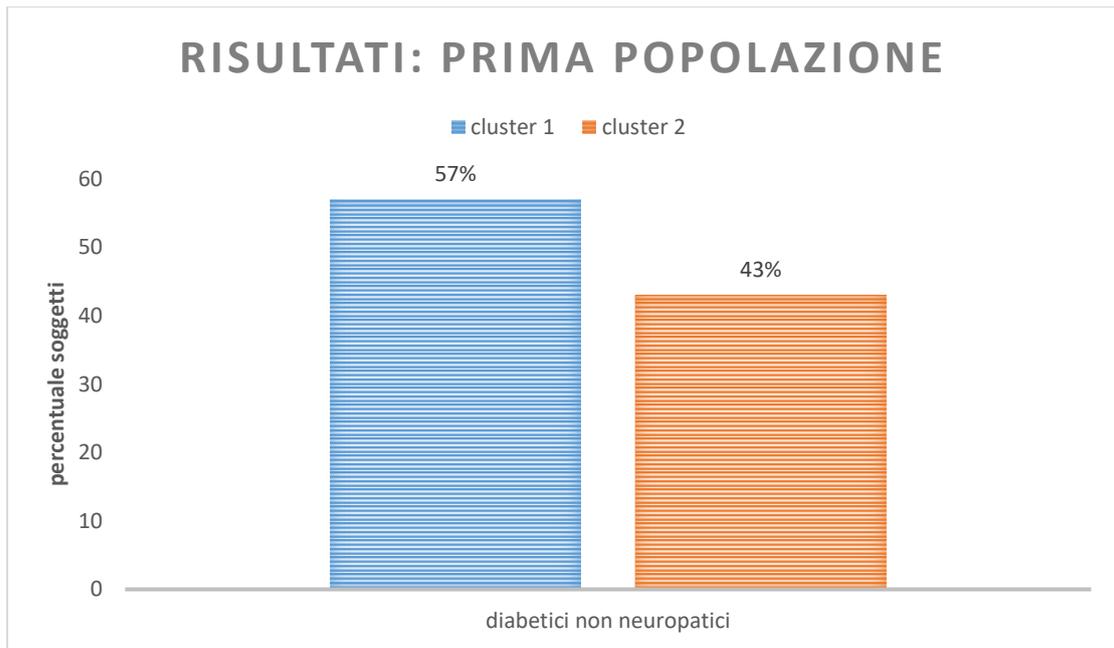
Per ogni soggetto di ciascuna popolazione si è valutata l'appartenenza a un cluster andando a studiare la Matrice U, definita come la matrice delle distanze tra i punti PDS e le coordinate del centroide, contenute nella matrice Centers. Per ogni valore di differenza percentuale di oscillazione (PDS), riferito a un soggetto, corrispondono due elementi della matrice U: il valore minore tra i due elementi identifica la prossimità del punto al centroide e quindi l'appartenenza del soggetto al cluster.

Significativa per la valutazione del comportamento dei soggetti è lo sviluppo della neuropatia diabetica nelle diverse popolazioni.

Per la prima popolazione ovvero i diabetici che non hanno sviluppato la neuropatia si è notato che l'oscillazione è maggiore ad occhi aperti rispetto a quelle a occhi chiusi (figura 18, *Tabella 2*), in base a un maggior numero di soggetti appartenenti al cluster c1.

*Tabella 2-numero di soggetti appartenenti ai cluster(DNN)*

Cluster	Numero soggetti (Prima popolazione)
c1	34
c2	26

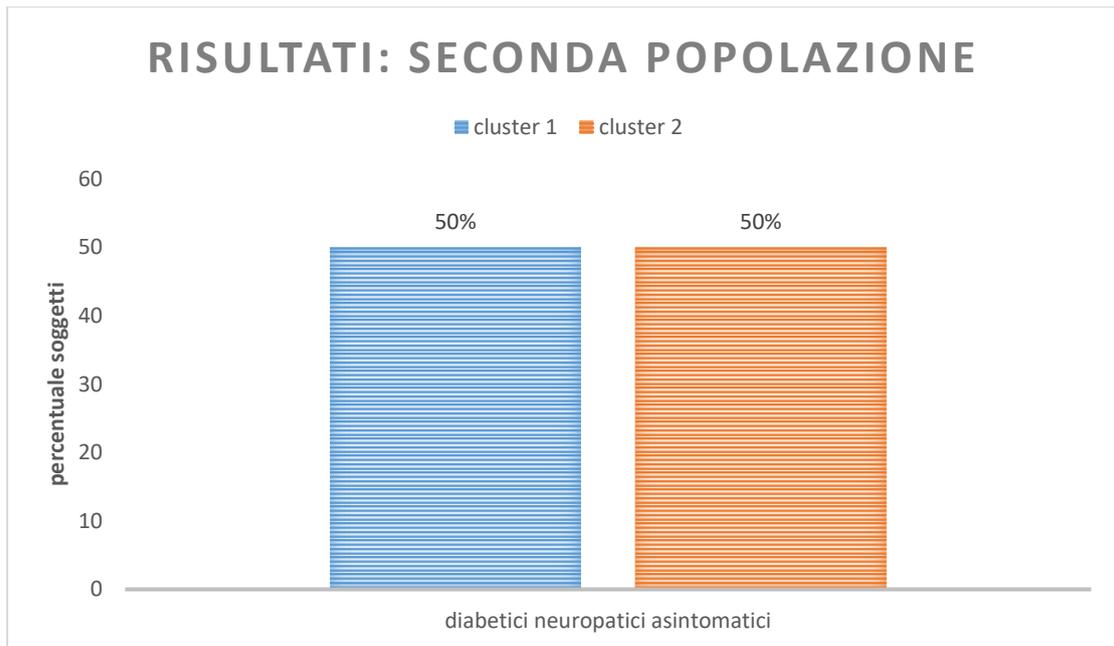


*Figura 18– Istogramma relativo alla prima popolazione (in percentuale).*

Per la seconda popolazione invece la percentuale di soggetti che oscillano a occhi chiusi eguaglia quella a occhi aperti (figura 19, *Tabella 3*).

*Tabella 3-numero soggetti appartenenti ai cluster (DNA)*

Cluster	Numero soggetti (Seconda popolazione)
c1	20
c2	20



*Figura 19– Istogramma relativo alla seconda popolazione (in percentuale)*

Per la terza popolazione invece, la percentuale dei soggetti a occhi chiusi oscilla di più dei soggetti a occhi aperti (figura 20, *Tabella 4*).

*Tabella 4-numero soggetti appartenenti ai cluster (DNS)*

Cluster	Numero soggetti (Terza popolazione)
c1	45
c2	52

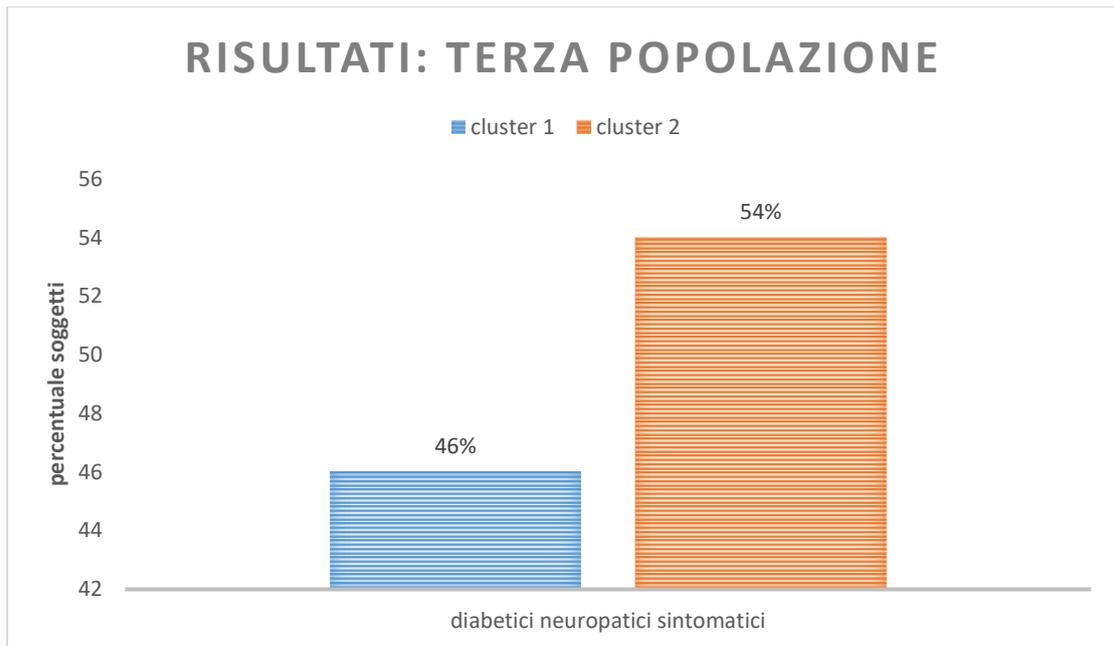


Figura 20– Istogramma relativo alla terza popolazione (in percentuale).

La situazione nel complesso risulterà:

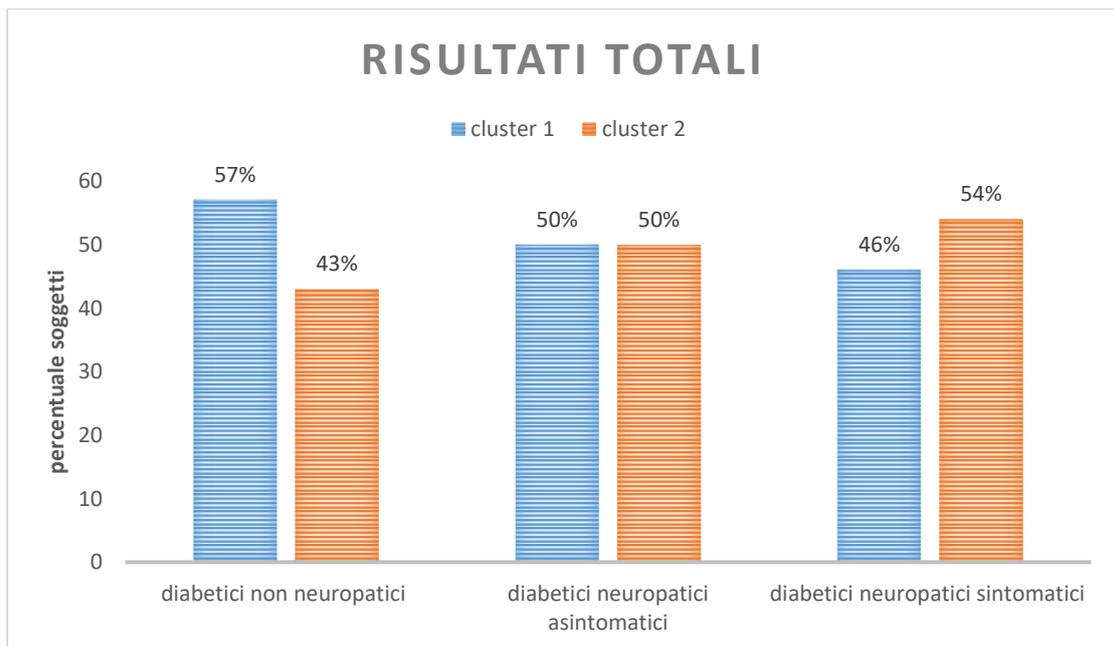


Figura 21– Istogramma generale (in percentuale).

È necessario prima di confrontare i comportamenti delle tre popolazioni ricordare che la neuropatia introduce tutte problematiche relative al mantenimento della postura e alla valutazione dell'ambiente circostante, una tra queste è la mancanza di propriocezione.

Quest'ultima è la capacità di percepire e riconoscere la posizione del proprio corpo nello spazio e lo stato di contrazione dei propri muscoli, senza il supporto della vista. Dalle conoscenze pregresse si è al corrente che se uno dei tre canali sensoriali, esterocettori e propriocettori muscolari, recettori vestibolari e afferenze visive, dovesse essere compromesso o alterato, il mantenimento della postura è garantito; ma nella condizione in esperimento in cui manca sia l'afferenza visiva (condizione OC) che la funzionalità dei propriocettori corretta (causata dalla neuropatia), non si può affermare altrettanto.

Questo spiega perché la terza popolazione (diabetici neuropatici sintomatici), ha una maggiore oscillazione a occhi chiusi: la complicanza microvascolare non permette al paziente di sfruttare altri sensi utili per riuscire a mantenere l'equilibrio (come il tatto dell'arto inferiore, o la propiocezione) quando la vista non può essere utilizzata (condizione OC).

Ad avvalorare questa tesi è il risultato ottenuto dai diabetici non neuropatici, che oscillano in numero maggiore a occhi aperti; da ciò si deduce che il loro comportamento, relativo al mantenimento della postura eretta, non si basa solo sul feedback visivo, proprio perché sono in possesso dell'apparato propriocettivo non alterato, ovvero muscoli e recettori specifici che determinano le correzioni necessarie a compensare le perturbazioni sull'equilibrio provenienti dall'ambiente esterno quando non si può utilizzare la vista.

I risultati hanno condotto a una valutazione del feedback visivo: il quale risulta di estrema importanza, per i soggetti diabetici neuropatici sintomatici, poiché non in possesso di tutte le afferenze sensoriali non mutate, confermando la rilevanza delle afferenze sensoriale nel mantenimento della postura, e in particolare quella visiva.

Per i diabetici che soffrono di neuropatia ma non hanno sviluppato alcun sintomo come perdita di sensibilità, formicolii, deficit vascolari, fino al piede diabetico, vi è una situazione di parità fra i soggetti: il 50% della popolazione oscilla maggiormente a occhi chiusi, mentre il restante 50, a occhi aperti; questo tipo di risultato non mi permette di poter valutare il feedback visivo.

## *Capitolo 6*

### CONCLUSIONE

Molti studi su pazienti con una varietà di disturbi, che colpiscono i recettori nervosi, in particolare modo i propriocettori, suggeriscono che la posturografia potrebbe essere un utile strumento clinico per valutare i problemi del mantenimento della posizione eretta.

[1]

In tal caso, in questo studio si è deciso di sfruttare le informazioni del COP per valutare il feedback visivo relativo all'analisi posturografica di soggetti affetti da diabete. Quest'ultimo gioca un ruolo importante poiché le complicanze derivanti da questa patologia, tra le quali ha assunto negli anni un ruolo sempre più rilevante la neuropatia, hanno compromesso l'equilibrio.

Nel corso dello svolgimento della tesi, è stato possibile notare il vantaggio che deriva dalla discriminazione dei soggetti affetti da diabete, non sulla base di caratteristiche metaboliche (ad esempio durata della malattia, sesso, BMI, età), ma sulla base dei dati derivanti dall'analisi dell'oscillazione del corpo, in funzione dell'aspetto visivo. Questo è stato effettuato mediante l'applicazione dell'algoritmo Fuzzy clustering.

I risultati trovati mettono a confronto comportamenti differenti tra le tre popolazioni considerate: la prima, che ha una percentuale maggiore di soggetti appartenenti al cluster c1, permette di comprendere come i soggetti non neuropatici sfruttino l'apparato propriocettivo per mantenere l'equilibrio quando si è in condizione occhi chiusi poiché l'oscillazione maggiore risulta ad occhi aperti.

È utile riportare successivamente il comportamento della terza poiché la maggioranza dei soggetti oscilla maggiormente a occhi chiusi, notando un comportamento differente dai soggetti della prima popolazione. Questo indica un'importanza maggiore del feedback visivo nei soggetti che hanno sviluppato una perdita di sensibilità, propriocezione ecc... dovuta alla neuropatia diabetica.

Per la seconda popolazione, con soggetti neuropatici asintomatici, non si hanno dati rilevanti per poter valutare il feedback visivo.

# RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Lorenzo Chiari, Andrea Bertani, Angelo Cappello, Classification of visual strategies in human postural control by stocastics parameters. *Human Movement Science* 19 817-842 ,2000.
- [2] Pontieri G. M., Elements of general pathology and general pathophysiology, 4 edizione. Piccin-Nuova Libreria, 2018.
- [3] American Diabetes Association, Classification and Diagnosis of Diabetes: Standards of Medical Care in Diabetes, 2018.
- [4] Moreira do Nascimento O. J., Castelo Branco Pupe C., Boiteux Uchôa Cavalcanti E., diabetic neuropathy. *Rev Dor. São Paulo*;17(Suppl 1):S46-51, 2016.
- [5] Zeljko Metelko, Neva Brkljacić Crkvenčić, Prevention of diabetic foot, *Acta Med Croatica*;67 Suppl 1:35-44, Oct 2013.
- [6] Dennis F. Bandyk, The diabetic foot: Pathophysiology, evaluation, and Treatment, Volume 31, Issues 2–4, Pages 43-48, June–December 2018
- [7] Haris M. Rathur, MRCP\*, Andrew J.M. Boulton, MD, The diabetic foot. *Clinics in Dermatology* 25, 109 – 120, 2007.
- [8] Y Agid, From posture to initiation of movement, *Rev Neurol (Paris)*;146(10):536-42,1990.
- [9] Fay B. Horak, Jane M. Macpherson. Postural orientation and equilibrium. *Handbook of physiology*. New York : Oxford University Press, 1996.
- [10] E.Martín Sanz, R.Barona De Guzmán, C.Comeche Cerverón, J.M.Bayda, Analysis of the interaction between visual and vestibular influence in postural control. Volume 55, Issue 1, Pages 9-16, 2004.
- [11] Ewelina Pankanin, Paulina Mietkowska. Methods used to measure postural balance. *Journal of Education, Health and Sport*. 2018
- [12] Montesinos L., Castaldo R., Pecchia L., On the use of approximate entropy and sample entropy with centre of pressure time-series. Montesinos et al. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*,2018.
- [13]I Testa,Bappenheim , M Barbaro Schiano, L Vinella-Pazienza, Anthropological aspects of the foot,*Arco Sci Med (Torino)*. aprile-giugno 1973;130(2):97-119.
- [14] L Pizzigalli, M Micheletti Cremasco, A Mulasso, A Rainoldi, The contribution of postural balance analysis in older adult fallers: A narrative review, Dec 18 2015.
- [15] Sinigaglia G, Analysis of measures for the assessment of postural balance, 2013.

- [16] Baratto L., Morasso P. G., Re C., Spada G., A new look at posturographic analysis in the clinical context: sway-density vs. other parameterization techniques. *Motor Control* 6, pp. 246-270, 2002.
- [17] Fioretti S., Scocco M., Ladislao L., Ghetti G., Rabini R.A., Identification of peripheral neuropathy in type-2 diabetic subjects by static posturography and linear discriminant analysis, 2010
- [18] <https://www.kistler.com/it/soluzioni/prove-in-ricerca-e-sviluppo/biomeccanica-e-pedana-di-forza/>
- [19] Jaejin Hwang, Kyung-Sun Lee, Classification of Whole-Body Postural Discomfort Using Cluster Analysis, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17(22), 8314, 2020.
- [20] James C. Bezdek, Robert Ehrlich, William Full, FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm. Volume 10, Issues 2–3, 1984, Pages 191-203, 1984.
- [21] Jain, AK e Dubes, RC, Algorithms for data clustering. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1988.
- [22] Chen Q., Huang M., Rough fuzzy model based feature discretization in intelligent data preprocess. *Chen and Huang Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications*, 2021.
- [23] [www.matlab.it](http://www.matlab.it)
- [24] Jian Zhang, Zongheng Ma, Hybrid Fuzzy Clustering Method Based on FCM and Enhanced Logarithmic PSO (ELPSO). 2020 Mar 18;2020:1386839. doi: 10.1155/2020/1386839. eCollection 2020.
- [25] Patrick K Kimes, Yufeng Liu, David Neil Hayes, James Stephen Marron, Statistical significance for hierarchical clustering. 2017 Sep;73(3):811-821. doi: 10.1111/biom.12647, 18 Jan 2017.
- [26] Jian Zhang, Zongheng Ma, Hybrid Fuzzy Clustering Method Based on FCM and Enhanced Logarithmic PSO (ELPSO). 2020 Mar 18;2020:1386839. doi: 10.1155/2020/1386839 2020.

## RINGRAZIAMENTI

*Chi mi conosce sa che non ho mai dato tanto peso alle parole, ho sempre preferito i fatti, ma la potenza di un grazie a volte può sostituire un grande gesto.*

*Sono una persona che fatica a chiedere aiuto, un po' per paura di non riceverne, un po' perché penso di poterci riuscire da sola. Bene, questi ringraziamenti sono soprattutto per chi mi ha aiutata, senza averglielo dovuto chiedere.*

*Detto questo, mi sembra giusto prima di tutto ringraziare la Prof.ssa Verdini perché mi ha dato la possibilità di sentirmi parte di una squadra, di farmi avvicinare il più possibile alla professione di ingegnere e di farmi sentire tale ogni volta che ho chiesto un consiglio o una spiegazione, trattandomi sempre con professionalità e cordialità.*

*Un ringraziamento va all'ing. Alessandro Mengarelli e all'ing. Andrea Tigrini, che si sono rivelati fondamentali per comprendere a pieno il lavoro che stavo affrontando sia nel tirocinio, che nella stesura della tesi. Con questo team mi sono sentita sempre una persona, e non una matricola, perché mi è sempre stato chiesto uno scambio di pareri e mai un lavoro da eseguire senza fiatare; un progetto bilaterale, che arricchisse entrambe le parti.*

*Un grande grazie va ai miei genitori Manola e Roberto, i miei primi fan, che mi hanno sempre sostenuta, ricordandomi quanto sia speciale. Sappiate che tutti i miei sacrifici sono ripagati ogni volta che guardandomi vedo la vostra espressione orgogliosa.*

*Per restare in tema, un ringraziamento va anche a mia sorella Michela, una ragazza piena di fantasia e gentilezza, che mi ha sempre supportato, anche a distanza. Sappi che ricambierò tutti i favori che mi hai fatto ascoltandomi ripetere decine e decine di volte per gli esami, quando toccherà a te.*

*Una menzione particolare va alla mia compagna di viaggio, Giorgia, che ha condiviso con me esami, pianti, ansie, vittorie, sorrisi e questo bellissimo traguardo. Anche se prenderemo due strade diverse, sappi che non ti lascerò mai andare.*

*Ringrazio le mie amiche da sempre Flavia e Laura, che mi conoscono da quando sono nata e continuano a tenermi per mano ancora oggi. Ringrazio anche Alice, Rebecca, Giulia che hanno agognato questo momento più di me e oggi sono pronte a festeggiarlo. Grazie anche a Alessia, Mavi e Marta, compagne perfette per questo viaggio durato 3 anni. Ringrazio le mie coinquiline Luc, Franci e Ale per i due anni vissuti insieme.*

*Mi sembra dovuto un ringraziamento a Michael, colleghi dal lontano 2013. Vedrai saremo ottimi ingegneri.*

*Arriviamo alle note dolci... un grazie di cuore va a Federico, che ha condiviso con me solo l'ultimo anno di questa esperienza ma è stato decisivo per la riuscita. Grazie perché mi hai insegnato che l'amore e lo studio possono andare di pari passo, riuscendo a vincere su entrambi i fronti, perché oggi porto a casa due vittorie: laurearmi con te affianco.*

*Ringrazio zia Daniela che è sempre stata come una seconda mamma, mi ha sempre esortato a essere me stessa, inseguire i miei sogni e cogliere le nuove opportunità.*

*Per ultimi, ma non meno importanti, ringrazio Nonno Peppe, Nonna Liliana e Nonno Osvaldo che mi hanno sostenuta da vicino e Nonna Alessia che ha fatto lo stesso, ma da lontano.*

*Ringrazio tutti coloro che mi hanno aiutata, la mia laurea è anche merito vostro. Beatrice.*