



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Biomedica

**IDENTIFICAZIONE DELLE ATTIVAZIONI MUSCOLARI PRINCIPALI DURANTE IL
CAMMINO TRAMITE ANALISI EMG**

**IDENTIFICATION OF THE MAIN MUSCLE ACTIVATIONS DURING THE WALK
THROUGH EMG ANALYSIS**

Tesi di Laurea di:
Andrea Serra

Relatore:
Prof. Sandro Fioretti

Correlatore:
Dr. Francesco Di Nardo

A.A. 2020 / 2021

INDICE

1: INTRODUZIONE	pag. 3
2: CONTRAZIONE MUSCOLARE	pag.6
2.1 STRUTTURA DELLA MOLECOLA E DEL FILAMENTO DI MIOSINA	pag.8
2.2 EVENTI BIOCHIMICI E MORFOLOGICI DEL FENOMENO CONTRATTILE	pag.9
2.3 REGOLAZIONE DEL FENOMENO CONTRATTILE	pag.11
2.4 MECCANISMI TIPICI DELLA CELLULA MUSCOLARE	pag.11
2.5 RAPPORTO TRA NERVI E TESSUTO MUSCOLARE	pag.13
2.6 ELETTROMIOGRAFIA	pag.16
3: ANALISI DEL CAMMINO	pag.19
3.1 GAIT CYCLE	pag.20
3.2 STANCE PHASE	pag.21
3.3 ATTIVITA' MUSCOLARE NELLE FASI DEL PASSO	pag.23
3.4 MOVIMENTI DELLA CAVIGLIA	pag.24
3.5 TIBIALE ANTERIORE E GASTROCNEMIO LATERALE	pag.26
4: MATERIALI E METODI	pag.30
4.1 CARATTERISTICHE DEI SOGGETTI	pag.30
4.2. ACQUISIZIONE DEL SEGNALE	pag.30
4.3 SIGNAL PROCESSING	pag.31
4.4 STATISTICAL GAIT ANALYSIS (SGA)	pag.32
4.6 OCCURENCE FRECUENCY	pag.33
5: PRESENTAZIONE DEI RISULTATI	pag.34
6: DISCUSSIONI E CONCLUSIONI	pag.49

CAPITOLO 1: INTRODUZIONE

L'analisi del movimento umano permette di valutare lo stato del sistema muscolo-scheletrico durante l'esecuzione di un atto motorio. Una attività particolarmente significativa e sintomatica della situazione motoria del paziente è rappresentata dall'atto della camminata, movimento molto complesso che vede coinvolte sinergicamente diverse articolazioni e risultato di interazioni estremamente raffinate tra i diversi muscoli e le diverse articolazioni. Per questo, la Gait Analysis, risulta una tecnica di fondamentale importanza che ha come obiettivo quello di fornire al clinico informazioni quantitative dettagliate in grado di caratterizzare la deambulazione di un paziente. Tramite questa analisi si ha la possibilità di definire il pattern deambulatorio del soggetto in esame, che consiste nella rilevazione tridimensionale di grandezze cinematiche, dinamiche ed elettromiografiche. Essa gode di alcune importanti proprietà, quali la non invasività e la tridimensionalità dei dati forniti e si pone come strumento di indagine nell'analisi del movimento umano. All'interno di un protocollo standard di Gait Analysis è spesso incluso il sistema per l'acquisizione e l'analisi del segnale elettromiografico (EMG) per la rilevazione della contrazione muscolare. Con elettromiografia (EMG) ci si riferisce ad una tecnica diagnostica, funzionale, di registrazione e analisi del segnale EMG per la valutazione funzionale dell'attività elettrica dei muscoli durante un compito motorio. Essa gioca un ruolo fondamentale nello studio del movimento, sia per le caratteristiche di non invasività che la contraddistinguono dall'elettromiografia ad ago, che per le potenzialità offerte dalle moderne tecniche di analisi computazionale del segnale, le quali permettono di descrivere quantitativamente e qualitativamente le condizioni di attività del distretto muscolare esaminato. Questa tecnica rappresenta inoltre un importante riferimento per lo studio di eventuali patologie, in quanto fornisce informazioni utili in merito al controllo nervoso quali contrazioni, co-contrazioni e sinergie muscolari [1]. Va infine detto che i dati elettromiografici acquisiti dalla muscolatura degli arti inferiori risultano fondamentali nello studio del cammino,

poiché rappresentano una valutazione oggettiva della funzione muscolare e quindi costituiscono un valido supporto al parere clinico. Negli ultimi 25 anni le tecniche di prelievo, registrazione ed elaborazione del segnale EMG hanno avuto uno sviluppo notevole, per tutta una vasta gamma di applicazioni, quali l'area diagnostica, terapeutica e riabilitativa. In merito a ciò sono stati condotti numerosi studi, i cui risultati sottolineano l'importanza dell'elettromiografia e forniscono dati normativi di riferimento nella deambulazione sia per soggetti sani che in soggetti patologici [2].

Un approccio innovativo nella valutazione delle contrazioni è costituito dalla Analisi statistica del cammino (Statistical Gait Analysis, SGA) [3]. La SGA permette di approfondire l'ampia variabilità presente nel cammino umano tramite lo studio di un numero molto elevato di passi per soggetto. La registrazione dell'attività elettromiografica per un lungo periodo di tempo permette al paziente di realizzare una camminata più spontanea di quella che si otterrebbe da un numero limitato di passi acquisiti nell'arco di pochi secondi. La mole consistente di dati raccolti si presta ad analisi differenziate, che contestualizzano i dati EMG con quelli raccolti dai sensori basografici, consentendo di individuare i pattern di attivazione dei muscoli in analisi. In questo modo si riesce a mettere in evidenza la variabilità dell'attività muscolare durante il cammino, cosa che può aiutare a migliorare l'interpretazione del segnale EMG sia nel caso fisiologico che patologico. L'approccio statistico che va a quantificare valor medio e deviazione standard di ogni intervallo di attivazione consente una presentazione sintetica ed esaustiva dei dati analizzati. Questa tecnica fornisce anche un nuovo parametro chiamato Occurrence Frequency (frequenza di reclutamento) di una specifica modalità di attivazione, che è quantificato dal numero (in percentuale) di passi in cui il muscolo viene reclutato con questa specifica modalità di attivazione, rispetto al numero di passi totali.

L'obiettivo del presente lavoro consiste nel mettere a punto una procedura basata sulla SGA che consenta di individuare un possibile pattern comune tra le diverse modalità di attivazione di uno

specifico muscolo durante il cammino di soggetti sani. Nel corso del nostro percorso sono state analizzate nello specifico le modalità di attivazione dei due muscoli della caviglia, ovvero il gastrocnemio laterale (GL) e il tibiale anteriore (TA), che risultano fondamentali nell'analisi del cammino per quanto riguarda l'attività di flessione dorsale e plantare del piede [5].

Il presente lavoro di tesi viene strutturato come segue: nella prima parte viene descritta la modalità di contrazione del muscolo; successivamente viene introdotta la descrizione dell'analisi del movimento in campo biomedico. La seconda parte riguarda nello specifico lo studio effettuato: dopo aver descritto materiali e metodi necessari per sviluppare questo studio, si passa alla descrizione, all'analisi e alla discussione dei risultati ottenuti.

CAPITOLO 2: CONTRAZIONE MUSCOLARE

Il tessuto muscolare si differenzia dagli altri tessuti, per una evidente caratteristica: la contrattilità, cioè il tessuto muscolare è capace di contrarsi, ovvero di accorciare la sua lunghezza. I tipi di tessuto muscolare sono tre, diversi sia istologicamente che funzionalmente:

- il tessuto muscolare striato scheletrico;
- il tessuto muscolare liscio;
- il tessuto muscolare cardiaco.

La principale differenza funzionale tra il primo e gli altri due è che, mentre il primo è governato dalla volontà, gli altri due sono indipendenti dalla volontà. Il tessuto muscolare scheletrico costituisce i muscoli che permettono il movimento le ossa, il tessuto muscolare liscio costituisce la muscolatura dei visceri. Il tessuto muscolare cardiaco permette al cuore di contrarsi; in particolare, anche il muscolo cardiaco è striato, quindi simile a quello scheletrico, però la sua contrazione ritmica è indipendente dalla volontà.

I tre tipi di tessuto muscolare

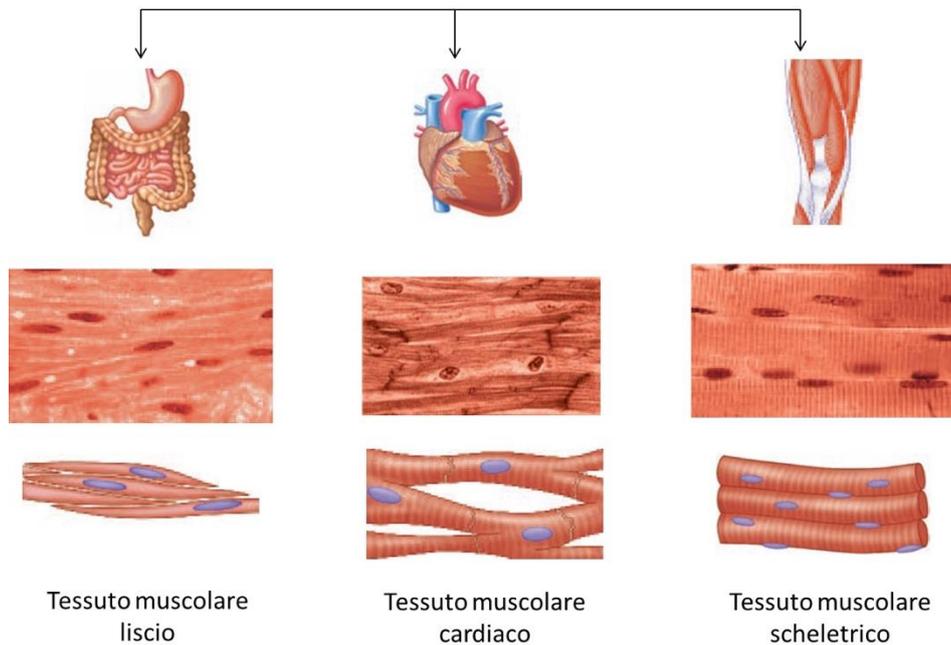


Fig. 2.1: Differenza tra i tessuti muscolari

Il muscolo striato è costituito da cellule, chiamate fibre muscolari, caratterizzate da una forma allungata, disposte longitudinalmente all'asse del muscolo e raccolte a fascette. Le caratteristiche principali della fibra muscolare striata sono tre:

1. E' molto grossa, la lunghezza può raggiungere alcuni centimetri, il diametro è di 10-100 micron (1 micron=1/1000 di mm.). Le altre cellule dell'organismo sono, con qualche eccezione, di dimensioni microscopiche.
2. Possiede molti nuclei (quasi tutte le cellule ne hanno uno solo) e viene definita per tale motivo un "sincizio polinucleato".
3. Si presenta striata trasversalmente, presenta cioè un alternarsi di bande scure e bande chiare. La fibra muscolare presenta nel suo citoplasma formazioni allungate, disposte longitudinalmente all'asse della fibra e quindi anche a quello del muscolo, dette miofibrille, possiamo considerarle come cordoni allungati posti dentro la cellula. Anche le miofibrille

sono striate trasversalmente e sono proprio esse le responsabili delle striature di tutta la fibra. [6]

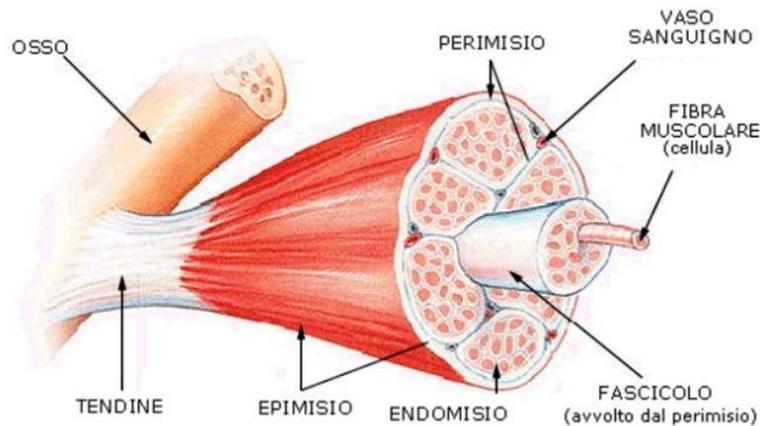


Fig. 2.2: Struttura generale del muscolo

Ogni fibra muscolare contiene migliaia di miofibrille, che occupano la maggior parte del volume intracellulare. Ciascuna miofibrilla è composta da diversi tipi di proteine: la miosina e l'actina, che sono proteine contrattili; la tropomiosina e la troponina, che sono proteine regolatrici; la titina e la nebulina, che sono proteine accessorie giganti (citoscheletro).

2.1 STRUTTURA DELLA MOLECOLA E DEL FILAMENTO DI MIOSINA

La miosina, nella sua forma più nota (miosina II o miosina sarcomerica), è una proteina in struttura quaternaria (peso molecolare intorno ai 500 kDa). Essa è un esamero le cui componenti polipeptidiche possono essere così raggruppate: due catene pesanti (200 kDa), che per un lungo tratto si avvolgono fra loro a formare un'elica lineare e, a un'estremità della molecola, divergono per assumere una configurazione globulare (teste della miosina), e due coppie di catene leggere (15 e 20 kDa), addossate alle teste. [7]

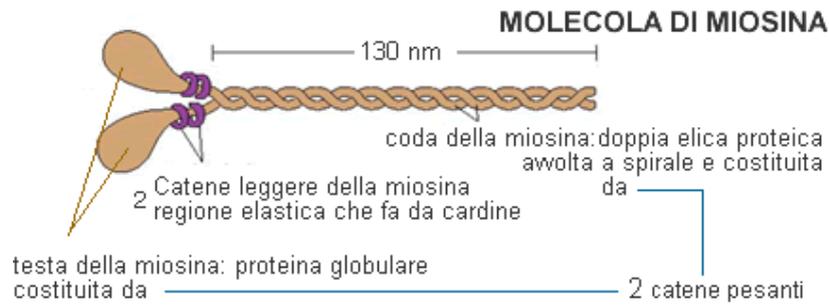


Fig. 2.3: Modello di una molecola di miosina che mostra la disposizione delle due catene pesanti e delle quattro catene leggere

Quanto descritto è riferibile alla miosina muscolare. Questa molecola tende, in condizioni adeguate, a formare filamenti nei quali le molecole di miosina interagiscono, orientandosi in modo caratteristico. Il filamento di miosina, infatti, appare costituito da due unità speculari; in ognuna di queste, le molecole si associano longitudinalmente, testa/coda, sfasandosi di un quarto dalla loro lunghezza e ruotando di 60 gradi. In questo modo, le code delle molecole si riuniscono a formare il corpo del filamento, mentre le teste sporgono dall'asse principale in diverse direzioni. Al centro del filamento, le molecole appartenenti alle due differenti metà si affrontano coda a coda (fig. 2.4) [7]

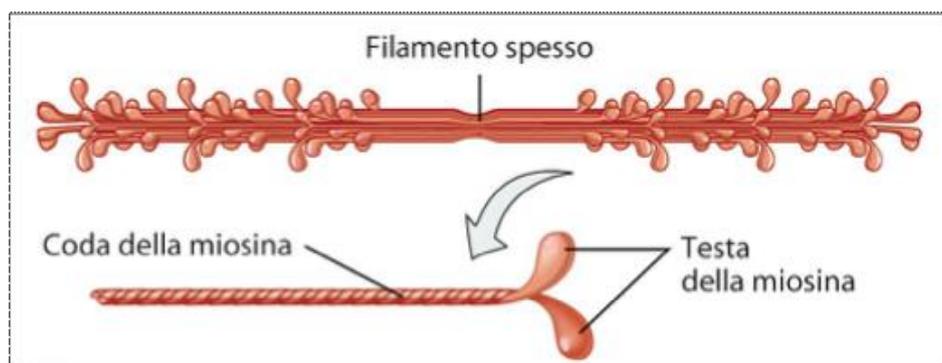


Fig. 2.4: Disposizione speculare delle molecole di miosina nell'ambito di un filamento spesso: in ciascuna delle due metà che costituiscono il filamento, le molecole sono orientate con la testa verso la relativa estremità della struttura filamentosa. Al centro del filamento, le molecole appartenenti alle due differenti metà si affrontano coda a coda

2.2 EVENTI BIOCHIMICI E MORFOLOGICI DEL FENOMENO CONTRATTILE

Parlando di contrattilità si pensa, immediatamente, alla cellula muscolare. Ciò non è esatto in quanto la contrattilità non è di sola competenza muscolare. E' corretto, altresì, dire affermare che, nella cellula muscolare, grazie all'ordinata e peculiare disposizione del materiale contrattile, il fenomeno contrattile raggiunge la massima resa funzionale. [7] Il fenomeno contrattile implica lo scivolamento (sliding) attivo di alcune strutture filamentose rispetto ad altre che rimangono immobili. In particolare, i filamenti di actina scorrono sui filamenti di miosina grazie all'attività delle teste della miosina stessa. La direzione del moto è unica ed è dettata dalla polarità del filamento di actina.

Le teste della miosina, infatti, muovono il filamento di actina in maniera che la sua pointed end risulti sempre rivolta verso il senso di moto. Gli attori principali della rappresentazione contrattile sono sempre l'actina e una miosina, indipendentemente dal tipo cellulare e dalla particolare configurazione spaziale delle strutture contrattili coinvolte. [7] L'interazione fra actina e miosina alla base della così detta motilità cellulare actino-mediata comporta uno stretto parallelismo fra eventi biochimici e i cambiamenti osservabili nella morfologia delle molecole interagenti. La formazione di legami trasversali transitori tra un filamento di actina e uno di miosina è un fenomeno ciclico, ATP-dipendente, che si svolge attraverso una serie di reazioni che implicano l'uso di F-actina, miosina, fosfato inorganico, ATP, ADP e ioni calcio. [7] In condizioni di riposo, la testa della miosina, su cui staziona una molecola di ATP, è staccata dall'actina e forma un angolo di 45 gradi rispetto al filamento actinico. Quando arriva il segnale di contrazione, la testa della miosina acquisisce la capacità di idrolizzare l'ATP. Avvenuta l'idrolisi, i prodotti di reazione rimangono attaccati alla testa, mentre l'energia liberata viene sfruttata, dalla testa stessa, per portarsi a 90 gradi rispetto al filamento di actina. A questo punto sussistono le condizioni necessarie per l'aggancio della testa della miosina al filamento di actina. Al momento dell'aggancio, i prodotti dell'idrolisi dell'ATP, che

continuavano a stazionare sulla testa, vengono rilasciati nel mezzo ambiente. Il fatto comporta il ritorno della testa alla primitiva configurazione (45 gradi). La testa della miosina, però, essendo agganciata al filamento di actina, nel suo movimento da 90 gradi a 45 gradi trascina il filamento di actina nella direzione che va dalla barbed end alla pointed end. [7]

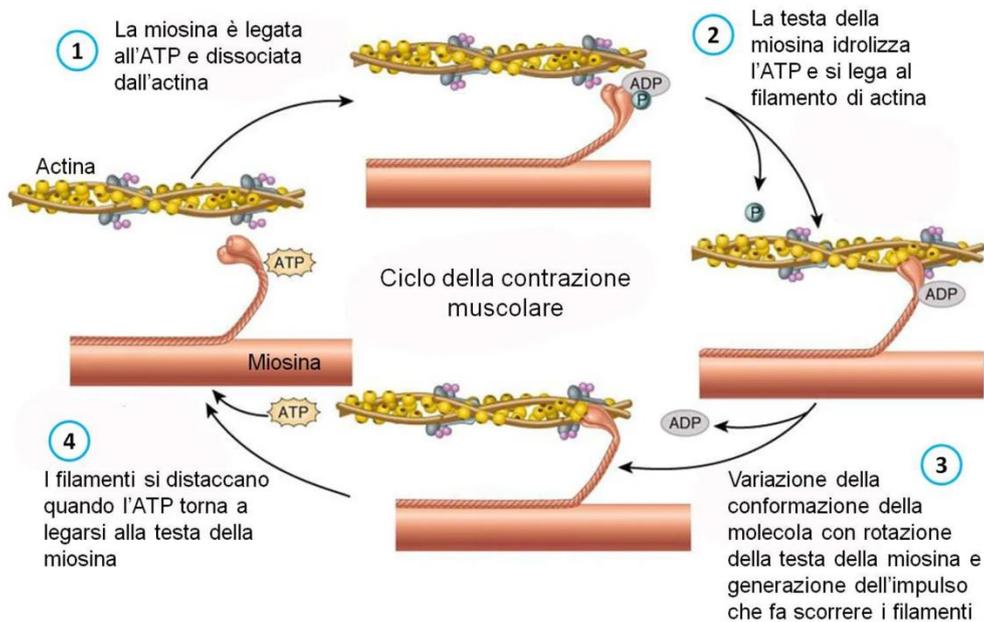


Fig 2.5: Eventi molecolari e morfologici della contrazione muscolare.

2.3 REGOLAZIONE DEL FENOMENO CONTRATTILE

Il segnale per la contrazione arriva, generalmente, dall'ambiente esterno alla cellula. Questo può essere di svariata natura, ma la cellula risponde sempre con il rilascio di un particolare secondo messaggero, il calcio. Lo ione calcio, dato il suo coinvolgimento in importanti fenomeni cellulari, viene tenuto a concentrazioni bassissime nel citoplasma libero, stipato in compartimenti citoplasmatici del sistema membranoso interno delle cellule, ma la sua disponibilità dipende dall'avvio di un segnale. In altri termini, le cellule devono possedere un interruttore on/off sensibile al calcio, capace di innescare gli eventi biochimici della contrazione. [7]

2.4 MECCANISMI TIPICI DELLA CELLULA MUSCOLARE

In una cellula muscolare striata scheletrica a riposo, il calcio viene trattenuto attivamente all'interno del reticolo endoplasmatico liscio. Il suo rilascio dipende dall'arrivo dell'impulso nervoso a livello della placca motrice. L'interruttore sensibile all'innalzamento della concentrazione di ioni calcio nel citoplasma è rappresentato da un complesso proteico che è parte integrante dei filamenti di actina. Esso è costituito da due proteine, la tropomiosina e la troponina, delle quali la seconda è calcio-sensibile. Durante la costruzione del filamento sottile, i due filamenti di tropomiosina vanno a disporsi in prossimità dei due solchi creati dall'avvolgimento ad elica delle due file di subunità proteiche del filamento di actina. Nella cellula muscolare a riposo, la troponina tiene il filamento di tropomiosina in una posizione tale da sovrapporlo ai siti di attacco per le teste della miosina situati sulle subunità actiniche. Con l'arrivo del segnale di inizio della contrazione, il calcio si diffonde passivamente nel citoplasma libero. Gli ioni calcio raggiungono, quindi, la concentrazione necessaria per il loro attacco alla subunità C della troponina. Contemporaneamente, gli ioni calcio attivano, nelle teste della miosina, la latente capacità ATPasica. Con l'arrivo del calcio la troponina cambia configurazione spaziale. Nella sua risistemazione spaziale essa, facendo perno sull'actina, sposta il filamento di tropomiosina, spingendolo in profondità, nel solco compreso tra le file delle subunità actiniche. Con il suo movimento, la tropomiosina lascia scoperti i siti di legame sull'actina per la testa della miosina che, nella precedente posizione, riusciva a schermare. [7]

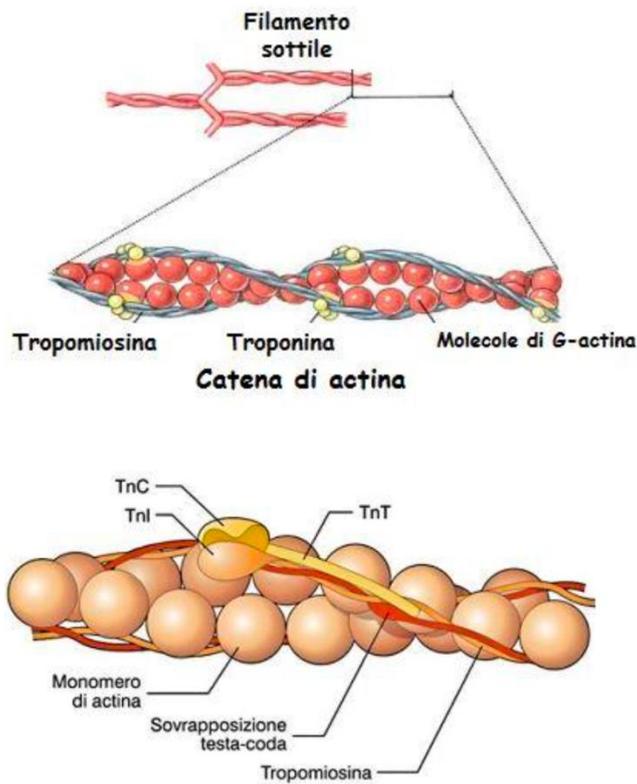


Fig. 2.6: Organizzazione dei monomeri di actina in un filamento sottile e disposizione delle proteine di tropomiosina e troponina

2.5 RAPPORTO TRA NERVI E TESSUTO MUSCOLARE

Il muscolo scheletrico non è in grado di contrarsi a meno che non sia stimolato da un nervo o artificialmente da elettrodi. Se le sue connessioni nervose sono danneggiate chimicamente alterate, un muscolo è paralizzato. Per questo la contrazione muscolare non si può comprendere senza prima comprendere il rapporto tra fibra nervosa e cellula muscolare. Qualsiasi punto dove una fibra nervosa incontra e stimola un'altra cellula è chiamato sinapsi. L'altra cellula può essere un altro neurone, la cellula di una ghiandola, una cellula muscolare, o un altro tipo di cellula. Il fulcro del rapporto nervo-muscolo è la sinapsi formata da una cellula nervosa e da una fibra muscolare scheletrica. [8]

I muscoli scheletrici sono innervati da cellule nervose chiamate neuroni motori somatici. I corpi cellulari di questi neuroni sono nel tronco cerebrale e nel midollo spinale; i loro assoni, chiamati fibre motorie somatiche, si portano ai muscoli scheletrici. Alla sua estremità distale, ogni fibra motoria somatica forma diramazioni per innervare numerose fibre muscolari, ma ogni fibra muscolare è innervata da un solo neurone motore. [8] Quando una fibra nervosa si avvicina ad una singola fibra muscolare, forma ancora delle diramazioni per stabilire parecchi punti di contatto in una regione ovoidale chiamata giunzione neuromuscolare (GNM) e placca terminale motoria. [8]

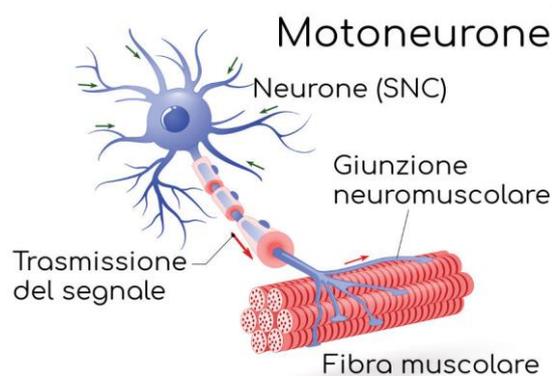


Fig. 2.7: Rapporto nervo-muscolo

Ogni ramificazione terminale di una fibra nervosa all'interno di una GNM forma una distinta sinapsi con la fibra muscolare. In ciascuna sinapsi, la fibra nervosa termina con un'espansione a forma di bulbo chiamata bottone sinaptico. Il bottone sinaptico non entra direttamente in contatto con la fibra muscolare ma ne è separato da uno spazio ristretto, chiamato fessura sinaptica, larga circa 60-100 nm. Un terzo tipo cellulare, chiamato cellula di Schwann, circonda la giunzione e la isola dal circostante fluido interstiziale. Il bottone sinaptico contiene organuli sferoidali chiamati vescicole sinaptiche che sono ripiene di un mediatore chimico chiamato acetilcolina (ACh). Quando un segnale nervoso arriva al bottone sinaptico, alcune di queste vescicole rilasciano la loro ACh per escitosi. L'ACh diffonde attraverso la fessura sinaptica e si lega a proteine di membrana chiamate recettori ACh sul sarcolemma. Questi recettori rispondono all'ACh iniziando eventi elettrici che portano alla

contrazione muscolare. Il sarcolemma ha dei ripiegamenti chiamati pieghe giunzionali che aumentano la superficie della membrana e permettono la presenza di un maggior numero di recettori, e così una maggiore sensibilità della fibra muscolare alla stimolazione nervosa. L'intera fibra muscolare è circondata da una lamina basale, uno strato sottile composto in parte di collagene e glicoproteine, che la separa dal tessuto connettivo circostante. La lamina basale passa da una parte all'altra della cellula di Schwann della giunzione neuromuscolare. Un enzima chiamato acetilcolinesterasi (AChE) si trova nel sarcolemma e nella lamina basale. Esso demolisce l'ACh dopo che l'ACh ha stimolato la cellula muscolare; per questo è importante per far cessare la contrazione muscolare. [8]

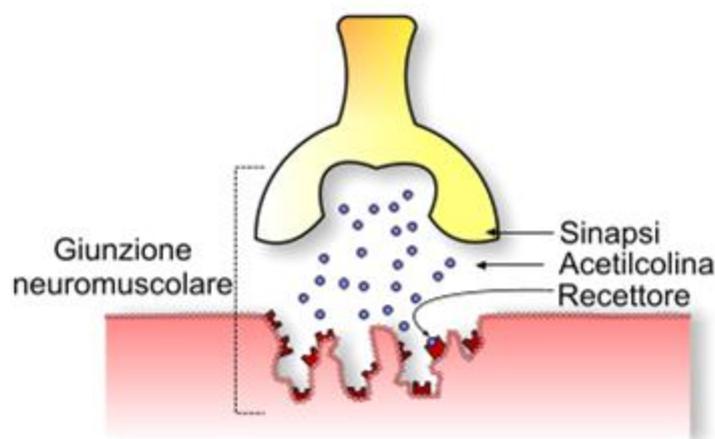


Fig. 2.8: Giunzione neuromuscolare

Quando un impulso nervoso si avvicina alla parte terminale di un assone, si diffonde in tutte le sue ramificazioni terminali e stimola tutte le fibre muscolari che sono raggiunte da esse e che si contraggono quindi tutte insieme. Dal momento che si comportano come una singola unità funzionale, la fibra nervosa e tutte le fibre muscolari da essa innervate, costituiscono un'unità motoria. Le fibre muscolari di una singola unità motoria non sono raggruppate insieme ma sono distribuite in tutto il muscolo. In questo modo, quando sono stimulate, provocano una contrazione debole in una vasta area e non solo una scossa localizzata in una piccola regione. Una contrazione

muscolare, perché sia efficace, di solito richiede l'attivazione di molte unità motorie in una sola volta. [8]

2.6 ELETTROMIOGRAFIA

L'elettromiografia (EMG) si basa su un esame funzionale che ha come oggetto la funzionalità elettrica di un muscolo, sia a riposo, sia quando viene sottoposto a una contrazione volontaria. L'elettromiografo è un sistema in grado di acquisire il segnale elettrico associato alla contrazione muscolare mediante elettrodi superficiali. [9] Questo studio è utile quando vi sono cause come: la riduzione della forza muscolare, la sensazione di perdita di sensibilità, una sensazione di formicolio, un dolore agli arti quando si comprime un muscolo. L'elettromiografia rivela un problema ma non dice la causa all'origine. Il segnale elettromiografico viene captato grazie a degli elettrodi inseriti nei muscoli o piazzati sulla cute. [9] I primi corrispondono ad elettrodi ad ago inseriti nel muscolo da esaminare. Si valuta per prima se si registra o meno un'attività elettrica muscolare spontanea a riposo; si registra l'attività elettrica del muscolo sottoposto a una lieve contrazione muscolare e successivamente a una contrazione gradualmente sempre più intensa. L'analisi durante la contrazione serve per valutare: ampiezza, forma e durata dei potenziali d'azione dell'unità motoria. A seconda di come il segnale è registrato, in generale, si parla di elettromiografia di superficie (sEMG) o elettromiografia "ad ago" (detta anche elettro-neurografia, ENG). L'EMG ad ago prevede l'utilizzo di aghi sottocutanei posti in diretto contatto con il muscolo di interesse (l'ago sarà tanto più lungo quanto più il muscolo è profondo), con questi elettrodi si può analizzare una singola unità motoria (l'EMG permette di "guardare" direttamente nel muscolo), in quanto questi permettono di monitorare una piccola area specifica. [9] La sEMG prevede il prelievo del segnale tramite degli elettrodi posti sulla pelle (elettrodi superficiali a placchetta) e serve per valutare l'attività elettrica muscolare; questo tipo di elettromiografia viene specialmente usato in fisioterapia per la

riabilitazione. In questo caso gli elettrodi monitorano un'area più estesa, i potenziali registrati andranno quindi ad evidenziare un gruppo di unità motorie (nervi) e la loro velocità di conduzione con gli elettrodi superficiali. Le unità motorie più vicine agli elettrodi danno un contributo più rilevante rispetto a quelle più lontane. Se gli elettrodi fossero posizionati male, potrebbero misurare la somma dei segnali di più muscoli adiacenti. Il segnale misurato è dunque influenzato da diversi fattori, tra cui il posizionamento degli elettrodi. Per quelli esterni, la misura è influenzata anche dalla pulizia della pelle che modifica l'impedenza di contatto. Per tutti questi motivi il segnale EMG permette di estrarre indicazioni solo "semi-quantitative" sulla forza generata dai muscoli, ma non rigorosamente quantitative. [9]

È importante, quindi, sottolineare che l'elettromiografia è un esame di tipo funzionale, cioè indaga la funzione del nervo o del muscolo. Esami come per esempio la risonanza magnetica, la TAC o l'ecografia sono viceversa esami di tipo morfologico. Questo fa sì che possiamo per esempio sapere se un nervo conduce male ed in che punto conduce male, però l'esame non ci dice se il problema è dovuto ad un'infiammazione, ad una compressione, oppure a qualcos'altro. Per questo è importante sapere che l'elettromiografia non sempre è in grado di precisare una diagnosi da sola; in certi casi è necessario eseguire altri esami ad integrazione. [10]

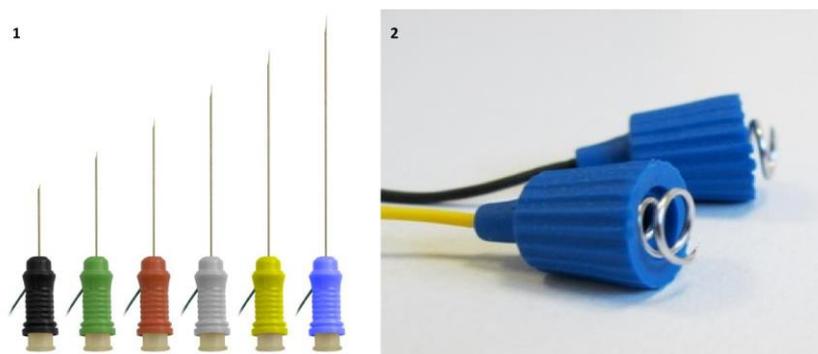


Fig. 2.9: Elettrodi ad ago: 1) Elettrodi ad ago concentrico; 2) Elettrodi ad ago subdermali a vite



Fig 2.10: 1) Elettrodi passivi superficiali: necessitano di un circuito di amplificazione esterna ; 2) Elettrodi attivi superficiali: hanno già integrato il circuito di pre-amplificazione, i quali già permettono di ridurre il rumore in ingresso, come tensioni parassite dovute ad accoppiamenti capacitivi o al movimento degli elettrodi.

CAPITOLO 3: ANALISI DEL CAMMINO

Il cammino utilizza una sequenza ripetitiva di movimento degli arti al fine di far avanzare il corpo mantenendo contemporaneamente la stabilità dell'appoggio. Questa serie di eventi è ripetuta da ogni arto in modo alternato, fino al raggiungimento della destinazione. Una singola sequenza di queste funzioni di arto è definita ciclo del passo (gait cycle) [12]. L'analisi del cammino consente di misurare il tasso di pronazione: questo a sua volta in base all'andatura aiuta a raggiungere l'obiettivo finale di assicurare maggiore efficienza dal punto di vista della biomeccanica, riducendo il rischio di lesioni e ottimizzando le prestazioni. Ciò comporta di camminare su una pedana per alcuni minuti mentre la videocamera riprende il cammino. Il filmato ottenuto viene poi rallentato, valutato e analizzato in dettaglio da uno specialista, che effettuerà una serie di valutazioni. Questo esame consiste nell'ottenere l'elaborazione numerica e la correlazione tra i dati fino ad ottenere un modello significativo del paziente confrontabile nel tempo con sé stesso o con altri soggetti [13]. L'utilizzo della Gait Analysis consente, infine, di affiancare alle valutazioni qualitative bidimensionali, delle valutazioni quantitative tridimensionali relative sia alla cinematica che alla dinamica del movimento e all'attivazione muscolare. Inoltre, la Gait Analysis permette una dettagliata valutazione dell'efficacia del trattamento effettuato sul paziente e sicuramente questo è l'aspetto più importante che porta un centro clinico a dotarsi di un laboratorio di Analisi del Movimento.

3.1 GAIT CYCLE

Le principali funzioni svolte dall'apparato locomotore sono per consentire la camminata sono:

- La generazione di una forza propulsiva;
- Il mantenimento della stabilità a livello superiore;
- L'assorbimento dello shock dovuto all'impatto con il terreno ad ogni passo;
- La conservazione dell'energia durante le funzioni precedenti, per minimizzare lo sforzo da parte dei muscoli.

Ogni azione del ciclo del passo confluisce direttamente nella successiva, per cui risulta difficile stabilire uno specifico evento di inizio e di fine del ciclo. Il momento del contatto con il suolo rappresenta l'evento più facile da definire, per cui viene generalmente indicato come la fase di inizio. Nelle persone comuni, il primo contatto a terra del piede con il suolo avviene tramite il tallone, ma dal momento che non tutti i pazienti hanno questa capacità, genericamente, il termine contatto iniziale viene utilizzato per indicare l'inizio del cammino. Ogni ciclo del passo è suddiviso in due periodi: appoggio e oscillazione. L'appoggio (stance) è il termine identificativo per l'intero periodo in cui il piede risulta in contatto con il terreno; l'oscillazione (swing) si riferisce al periodo in cui il piede si trova sollevato per l'avanzamento dell'arto. L'appoggio è suddiviso in tre intervalli in funzione della sequenza del contatto con il suolo da parte dei due piedi (Fig.2.1). Entrambe l'inizio e la fine comprendono un periodo di doppio appoggio, mentre durante la parte intermedia il contatto è di un solo piede. Il doppio appoggio iniziale costituisce l'inizio del ciclo del passo; rappresenta il tempo in cui entrambi i piedi si trovano a contatto con il suolo dopo il contatto iniziale. L'appoggio singolo inizia con il distacco del piede opposto per l'oscillazione. Durante l'appoggio singolo l'intero peso del corpo grava su quell'estremità. Il doppio appoggio terminale ha inizio con il contatto al suolo dell'altro piede e continua finché l'arto che era in appoggio inizialmente si distacca per l'oscillazione. Il passo è l'unità funzionale dell'analisi del cammino, definito dall'intervallo di spazio e tempo tra due contatti iniziali successivi dello stesso piede. [11]

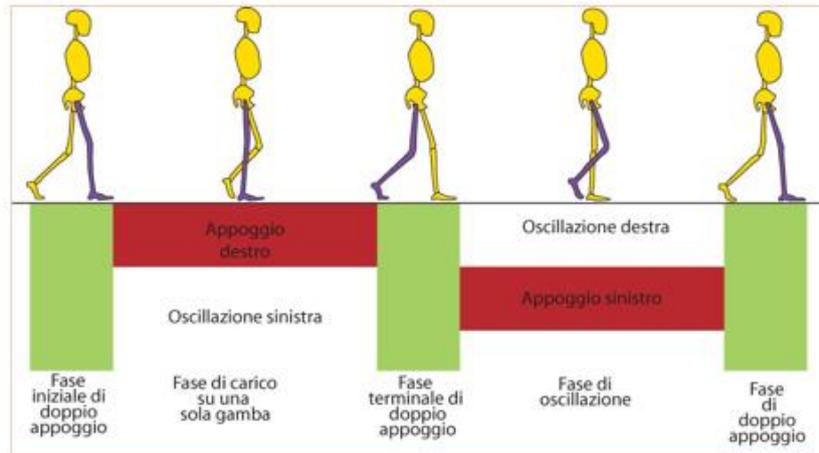


Fig. 3.1: Appoggio del piede nel passo: le barre verdi verticali rappresentano periodi di doppio appoggio (piede destro e sinistro). La barra orizzontale rossa esprime l'appoggio singolo destro e sinistro. L'appoggio totale include tre periodi: il doppio appoggio iniziale, l'appoggio singolo e il successivo doppio appoggio (terminale). L'oscillazione è raffigurata con la barra bianca che segue il doppio appoggio (terminale). Da notare che l'appoggio singolo destro coincide con lo stesso intervallo di oscillazione sinistra e durante l'oscillazione destra si verifica l'appoggio singolo sinistro. La terza barra verticale (doppio appoggio) inizia il successivo ciclo del passo.

3.2 STANCE PHASE

La fase di stance fa parte nel gait cycle e si verifica quando il piede è a contatto con il suolo. Inizia con l'appoggio del tallone e termina con la punta dello stesso piede. Essa costituisce il 60% del ciclo del passo. [12] Lo stance ha diverse fasi:

Heel Strike

Ha inizio nel momento in cui il tallone viene a contatto con il pavimento. La caviglia è in posizione neutra, il ginocchio è leggermente flesso e l'anca ha una flessione di circa 30 gradi. Con il colpo al tallone, il peso corporeo inizia a spostarsi sull'arto di posizione.

Foot Flat

In questa fase, l'intero piede è a contatto con il suolo. La caviglia si sposta di circa 5-10 gradi di flessione plantare e il ginocchio si sposta in 15 gradi di flessione. L'anca subisce uno spostamento in estensione consentendo al tronco e al corpo di raggiungere l'arto. Il peso del corpo continua a spostarsi sull'arto della posizione. [25]

Mid Stance

In questa fase, il corpo passa sopra l'arto di posizione e la gamba si avvicina alla posizione verticale offrendo supporto per un singolo arto con l'altro arto che oscilla liberamente in avanti. La caviglia effettua una dorsiflessione leggera, il ginocchio si estende e l'anca continua ad estendersi. Il tronco è nella posizione neutra di rotazione e le braccia sono parallele al corpo. [25]

Heel Off

Si verifica quando il tallone inizia a sollevarsi dal suolo. La caviglia è inizialmente in dorsiflessione e successivamente in flessione plantare. Il ginocchio è esteso e si prepara a flettersi, l'anca è in iperestensione e il tronco ruota dallo stesso lato. [25]

Toe Off

In questa fase, l'anca diventa meno estesa e il ginocchio è flesso di 35-40 gradi. La flessione plantare della caviglia aumenta fino a 20 gradi. Le dita dei piedi lasciano il suolo e vanno in iperestensione. Contemporaneamente, il piede opposto è in fase di piede piatto. Alla fine di questa fase, l'anca inizia la flessione. [25]

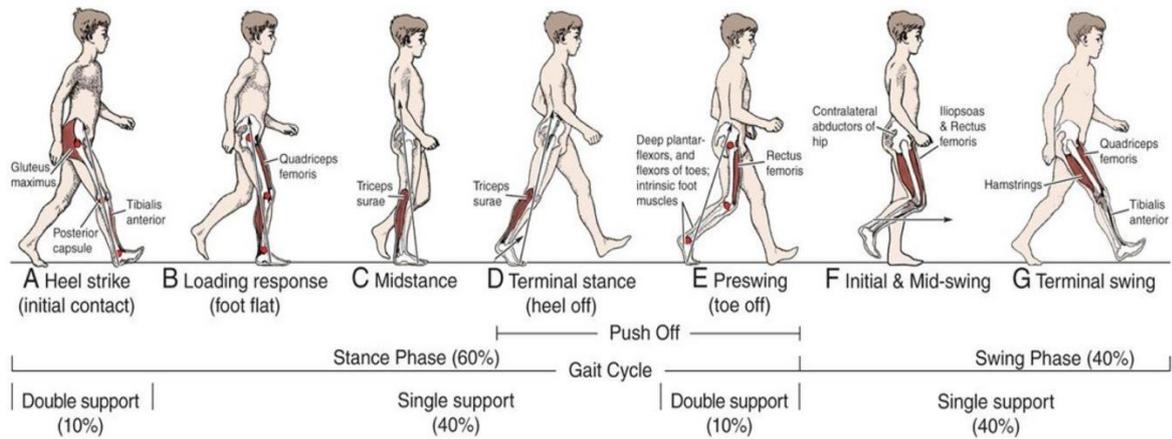


Fig. 3.2: Rappresentazione fasi del passo

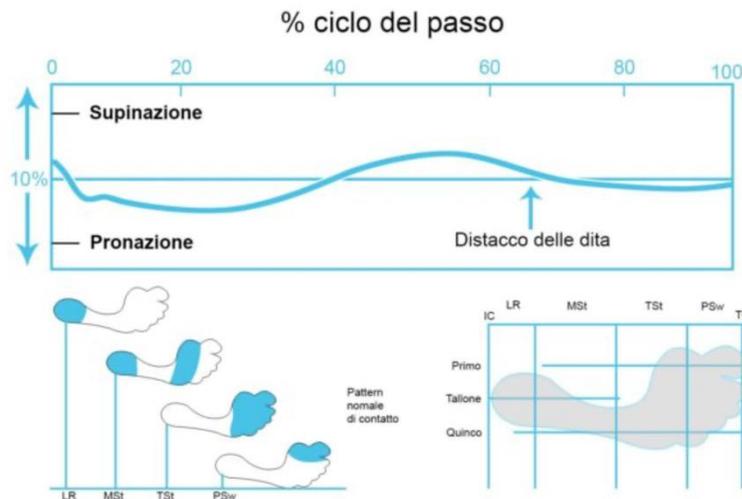


Fig. 3.3: Aree di contatto del piede con il pavimento durante la fase di stance e di swing

3.3 ATTIVITA' MUSCOLARE NELLE FASI DEL PASSO

I muscoli della gamba entrano in gioco durante la fase propulsiva e nella spinta prodotta dall'avampiede ed in fase di arresto, facendo sì che il dispendio di energia sia ridotto in caso di perdite di equilibrio. In decelerazione il lavoro della muscolatura risulta eccentrico. Durante l'Heel Strike, i muscoli che si attivano sono: il quadricipite, attuando una contro flessione del ginocchio, il gruppo di muscoli ischiocrurali, responsabili della flessione insieme al grande gluteo, e l'ileopsoas controlaterale che consente l'avanzamento dell'arto inferiore controlaterale. A seguito di questo, nella Mid Distance si attivano: i muscoli flessori plantari per contrastare l'abbassamento della tibia;

il gastrocnemio, che rallenta la caduta del corpo in avanti; il medio gluteo e il piriforme, e infine il tensore fascia lata che ha il compito di stabilizzare il bacino. Durante l'Heel Off, il grande gluteo accentua l'estensione dell'anca. Successivamente entrano in gioco i flessori plantari e il tibiale anteriore che accelera la perdita di equilibrio facilitando la caduta in avanti del corpo. L'ultimo step del passo è il Toe Off, durante il quale i muscoli intrinseci stabilizzano la medio-tarsica, il quadricipite limita la flessione del ginocchio, gli ischiocrurali si attivano contro la flessione dell'arto e gli adduttori, contro l'eccessivo spostamento del bacino omolaterale. [14]

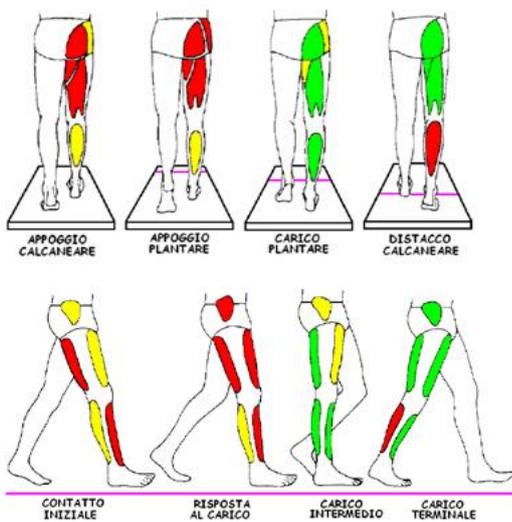


Fig 3.4: Attivazione muscolare fase di appoggio

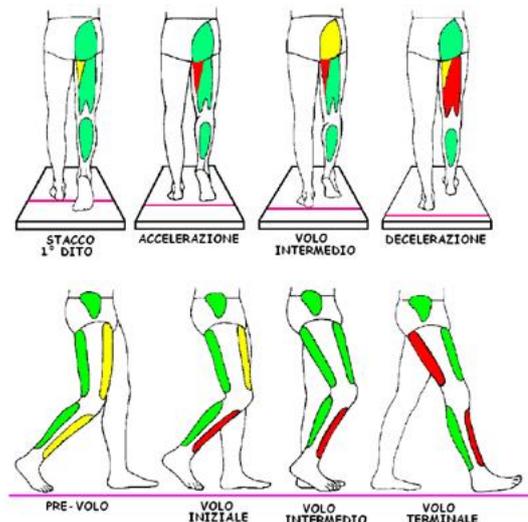


Fig 3.5: Attivazione muscolare fase di oscillazione

3.4 MOVIMENTI DELLA CAVIGLIA

La caviglia è una articolazione sinoviale del corpo umano, localizzata all'estremità distale delle ossa della gamba (tibia e perone) e all'estremità prossimale del talo (una delle 7 ossa tarsali del piede), su cui poggia tutto il peso del corpo, per cui deve essere sempre ben libera in tutti i suoi gradi di movimento.

I movimenti della caviglia sul piede (articolazione tibiotarsica) sono:

- Flessione dorsale: pianta e punte dei piedi si sollevano da terra
- Flessione plantare: tallone si solleva e si rimane sulle punte
- Pronazione: la parte esterna del piede (laterale) si solleva e la parte interna (mediale) rimane a terra
- rimane a terra
- Supinazione: la parte mediale si solleva e la parte laterale rimane a terra [15]

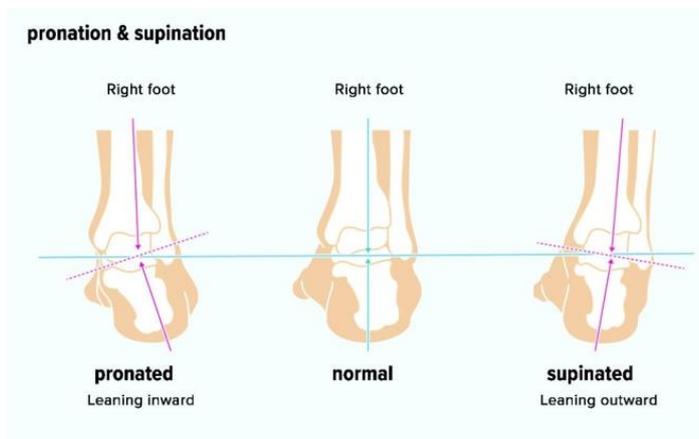


Fig. 3.6: Pronazione e Supinazione



Fig 3.7: Flessione dorsale e Flessione plantare

La dorsiflessione, o flessione dorsale, è usata durante il camminare; questo movimento consente il sollevamento del piede e consente di camminare sui talloni. Eventuali problematiche relative alla dorsiflessione verranno compensate naturalmente dal corpo, causando eventualmente danni ad altre parti del corpo. Per effettuare una dorsiflessione, il piede dovrebbe sollevarsi verso l'alto tra i 10 e i 30 gradi. Essa utilizza i muscoli nella parte anteriore del piede, che sono:

- tibiale anteriore
- estensore lungo dell'alluce longus
- estensore lungo delle dita
- muscolo peroneo terzo

I muscoli tibiale anteriore e estensore lungo dell'alluce, nella fase di contrazione provocano una leggera intra-rotazione ed inversione del piede, mentre peroneo terzo ed estensore lungo delle dita dei piedi sono extra-rotatori ed eversori. La flessione plantare è l'opposto della flessione dorsale e comporta il movimento del piede verso il basso. Essa si verifica quando il piede è spostato verso il basso tra i 20 e i 50 gradi. I muscoli, i cui tendini causano flessione plantare, si trovano nella parte posteriore della gamba e passano nella parte posteriore del piede attraverso l'articolazione della caviglia. Questi includono: tibiale posteriore, flexor digitorum longus, gastrocnemio, soleo. [16]

3.5 TIBIALE ANTERIORE E GASTROCNEMIO LATERALE

Il tibiale anteriore è il muscolo più mediale dei quattro muscoli anteriori della gamba. È un dorsiflessore del piede che tira il dorso verso lo stinco. La dorsiflessione provoca il sollevamento delle dita del piede da terra, che è un movimento fondamentale durante la deambulazione e la corsa. Il tibiale anteriore fornisce anche una leggera inversione del piede tirando la superficie plantare del piede verso la linea mediana del corpo. Questa azione è importante per bilanciare il peso del corpo sul piede durante il movimento o in piedi.[17] Risulta essenziale nella fase iniziale di appoggio durante il movimento, di oscillazione, nel contatto del tallone col suolo. Per queste sue funzioni, risulta essere il muscolo più resistente, il più forte dei flessori dorsali del piede. [18] (Fig. 3.7) Il tibiale anteriore comincia la sua attivazione nella fase finale della pre-oscillazione (56% ciclo del passo) per poi intensificarsi durante l'oscillazione iniziale per effettuare il sollevamento del piede. Il movimento limitato che ne consegue è, tuttavia, dovuto all'inerzia che deve essere superata. L'azione dei muscoli pretibiali appare vivace anche nelle ultime due fasi dell'oscillazione per assicurare la continuazione della flessione dorsale della tibiotarsica e il posizionamento del piede per l'azione di rotolamento. Nel contatto iniziale il tibiale anteriore stabilizza l'articolazione tibiotarsica frenando la velocità di flessione plantare passiva e consentendo la progressione durante la risposta al carico. [19] (Fig.3.8)



Fig. 3.8: Posizione del Tibiale anteriore

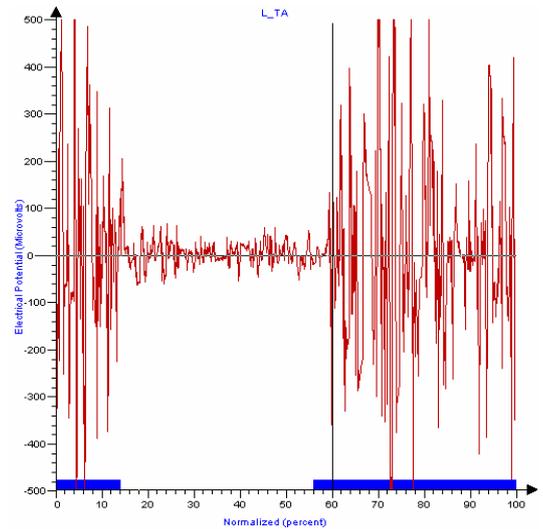


Fig. 3.9: Elettromiografia Tibiale anteriore

La sua posizione può essere individuata tramite la flessione dorsale del piede (Fig. 2.9), mantenendo il tallone in contatto con il terreno: in questo modo viene evocata in condizione statica la contrazione del muscolo che si ingrossa e diventa ben visibile e palpabile. Per studiare biomeccanicamente l'attivazione del tibiale anteriore, l'elettrodo deve essere applicato nella direzione delle fibre muscolari che sono verticali, dirette dal basso verso l'alto, in modo tale che il segnale EMG possa essere prelevato correttamente.

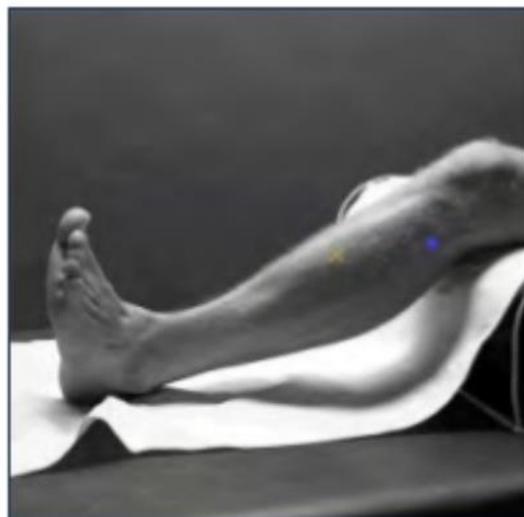


Fig. 3.10: Posizionamento dell'elettrodo per il muscolo tibiale anteriore

Con “gastrocnemio” (anche chiamato “gemelli”) in anatomia si indica un muscolo situato nella parte posteriore della “gamba”, cioè della parte dell’arto inferiore che collega il ginocchio alla caviglia. Il muscolo gastrocnemio, assieme al muscolo soleo è il principale responsabile della flessione plantare del piede, ma partecipa anche alla flessione del ginocchio [20]. Tutti i muscoli contengono in varie percentuali fibre a contrazione rapida e fibre a contrazione lenta e nel muscolo gastrocnemio prevalgono le fibre rapide che gli conferiscono la capacità di contrarsi molto energicamente e molto rapidamente. La contrazione deve avvenire a velocità moderatamente rapida per consentire sufficiente velocità al movimento della gamba. [21] Il gastrocnemio estende il piede, lo ruota internamente, e partecipa anche alla flessione della gamba. Con la sua contrazione partecipa, inoltre, all’inizio della pre-oscillazione e all’elevazione del tallone da terra [19] (Fig.3.11). Nell’appoggio terminale, il gastrocnemio è il muscolo che offre il maggior contributo alla spinta del piede sul terreno in direzione dietro basso (push off). Il gastrocnemio è anche flessore plantare della tibiotarsica. [23]



Fig. 3.11: Gastrocnemio laterale destro e sinistro

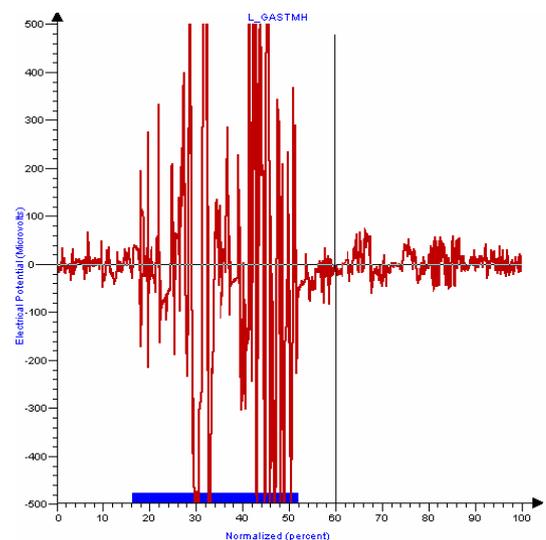


Fig. 3.12: Elettromiografia Gastrocnemio laterale

La posizione del gastrocnemio può essere individuata attraverso un movimento della flessione plantare del piede, richiedendo al soggetto di alzare i talloni restando in equilibrio sulle punte: in questo modo si riduce la contrazione del gastrocnemio che, in quanto muscolo superficiale, diviene ben visibile e palpabile. L'elettrodo va applicato in direzione delle fibre, che sono dirette verticalmente, dall'altro verso il basso.

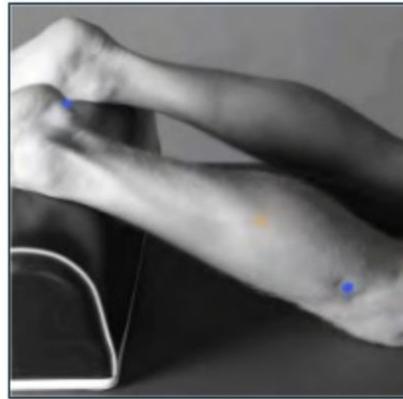


Fig. 3.13: Posizionamento dell'elettrodo per il muscolo gastrocnemio laterale, i pallini in blu indicano a testa della fibula e il calcagno, mentre la x indica a corretta posizione dell'elettrodo

L'attivazione di questi due muscoli avviene durante il cammino o la corsa, dato che entrambi sono muscoli che permettono di effettuare una deambulazione in modo corretto evitando di compromettere le sinergie del sistema muscolare durante lo sforzo fisico. Il gastrocnemio si attiva all'inizio del passo quando il piede tocca con il tallone il pavimento, quando invece il baricentro del corpo viene spostato in avanti sulla punta del piede, si attiva il tibiale anteriore. Questo ciclo di attivazione muscolare si riscontra nella deambulazione di un soggetto sano, insieme all'attivazione di altri muscoli che permettono il passo. Sia il gastrocnemio che il tibiale anteriore, sono muscoli molto sviluppati, essendo il cammino il principale atto motorio della vita quotidiana.

CAPITOLO 4: MATERIALI E METODI

4.1 SOGGETTI

Il presente studio si è avvalso di dati sEMG e basografici che sono stati acquisiti presso il Laboratorio di Analisi del Movimento del Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italia, che riguardano l'andatura di 26 soggetti adulti sani. Le caratteristiche dei soggetti, riportate come valore medio \pm deviazione standard (SD), sono: altezza = 174 ± 9 cm; massa = $64,1 \pm 11,2$ kg; età = $23,6 \pm 1,7$ anni; rapporto femmine/maschi = 16/14.

4.2. ACQUISIZIONE DEL SEGNALE

I segnali sono stati acquisiti (frequenza di campionamento: 2kHz; risoluzione: 12 bit) ed elaborati dal sistema di registrazione multicanale Step32, Medical Technology. Ogni soggetto è stato dotato di interruttori basografici, elettrogoniometri a ginocchio e sonde sEMG su entrambi gli arti inferiori. Tre interruttori basografici (dimensioni: 11 mm \times 11 mm \times 0,5 mm; forza di attivazione: 3 N) sono stati fissati sotto il tallone, la prima e la quinta testa metatarsale di ciascun piede. Un elettrogoniometro (precisione: 0,5) è stato attaccato al lato esterno di ciascun arto inferiore per misurare gli angoli dell'articolazione del ginocchio in piano sagittale. I segnali sEMG sono stati rilevati con singole sonde differenziali a geometria fissa costituite da dischi Ag/Ag-Cl, e con geometria variabile costituita da dischi Ag/Ag-Cl. I segnali sEMG sono stati ulteriormente amplificati e filtrati passa-basso (450 Hz) dal sistema di registrazione. Un guadagno complessivo, compreso tra 1000 e 50.000, potrebbe essere scelto in base alle esigenze del muscolo specifico osservato.

Prima di posizionare le sonde, la pelle è stata rasata, pulita con pasta abrasiva e quindi bagnata con un panno imbevuto. Per assicurare il corretto contatto elettrodo-pelle, gli elettrodi sono stati rivestiti con gel altamente conduttivo. Le sonde con geometria fissa sono state applicate su GL e TA e le sonde con geometria variabile sono state applicate su RF e VL, seguendo le raccomandazioni

SENIAM per la posizione e l'orientamento degli elettrodi sul muscolo rispetto ai tendini, al punto motorio e alla direzione delle fibre.

La possibilità di cross-talk è stata verificata mediante ispezione visiva dei dati grezzi. Il cross-talk è stato sospettato quando due muscoli nella stessa sezione dell'arto hanno mostrato un'attività simultanea con una modulazione di ampiezza simile. In particolare, durante la risposta al carico è stato sospettato un cross-talk di VL sull'attività RF.

4.3 SIGNAL PROCESSING

I segnali basografici vengono processati con l'obiettivo di caratterizzare quattro livelli di interazione piede-terreno, contatto del tallone (H), contatto del piede piatto (F), push off (P), oscillazione (S) ed elaborati per segmentare e classificare i diversi cicli di andatura.

I segnali elettrogoniometrici sono stati filtrati passa basso. Gli angoli del ginocchio nel piano sagittale insieme alle sequenze e alle durate delle fasi dell'andatura derivate dal segnale basografico, sono stati utilizzati da un filtro statistico multivariato, per rilevare e scartare cicli anomali come quelli relativi a decelerazione, inversione e accelerazione. Il filtro statistico multivariato verifica gli angoli del ginocchio e la durata delle fasi del cammino da ogni falcata del soggetto, confrontandoli con il valore medio calcolato su ogni singolo soggetto. Quando gli angoli del ginocchio e/o le fasi del passo nel singolo passo sono significativamente differenti (test t di Hotelling, $\alpha = 0,05$) dal valore medio, il passo corrispondente è stato scartato.

I segnali sEMG sono stati filtrati passa-alto che sostanzialmente rimuove gli artefatti del movimento ed elaborati da un rilevatore statistico a doppia soglia che consente una valutazione indipendente dall'utente degli intervalli di attivazione muscolare. Il rivelatore statistico comprende anche un'elaborazione preliminare dei dati: filtro sbiancante e identificazione di una serie temporale ausiliaria. Questa tecnica consiste nel selezionare un primo soglia ζ e osservando m campioni

successivi: se almeno r_0 (seconda soglia) su m campioni successivi sono superiori alla prima soglia ζ , viene riconosciuta la presenza del segnale. I valori dei tre parametri ζ , r_0 e m sono selezionati per minimizzare congiuntamente il valore della probabilità di falso allarme e massimizzare la probabilità di rilevamento per ogni specifico rapporto segnale-rumore (SNR). L'impostazione della prima soglia ζ si basa sulla valutazione del livello del rumore di fondo, come parametro di input necessario. Inoltre, il rivelatore a doppia soglia richiede di stimare l'SNR per mettere a punto r_0 . Il livello del rumore di fondo e l'SNR, necessari per eseguire l'algoritmo a doppia soglia, sono stimati per ciascun segnale dal sistema Step32, utilizzando l'approccio statistico proposto da Agostini e Knaflitz [22]. Infine, $m = 30$ ms è considerato un valore adatto per lo studio dell'attivazione muscolare nell'analisi del cammino.

4.4 STATISTICAL GAIT ANALYSIS (SGA)

In questo studio, la deambulazione umana è stata caratterizzata per mezzo di caratteristiche medie di SEMG e parametri spazio-temporali estratti da centinaia di passi consecutivi per ciascun soggetto. A questo scopo è stato adottato un approccio recente, basato sulla dipendenza dal ciclo dell'attivazione muscolare durante l'attività di deambulazione. I parametri sEMG sono stati mediati su quei cicli includendo lo stesso numero di attivazioni (cioè su ogni singola modalità di attivazione). La modalità di attivazione definisce il numero di volte che un muscolo si attiva durante un singolo ciclo di andatura: la modalità di n -attivazioni consiste di n intervalli attivi per il muscolo considerato durante un singolo ciclo di andatura. Per fornire intervalli medi di attivazione muscolare per ciascuna modalità, sono stati calcolati gli istanti di attivazione e disattivazione muscolare in ogni ciclo del passo. Le attivazioni muscolari sono state quindi raccolte in base al numero di intervalli rilevati, cioè relativamente alla loro modalità di attivazione. Infine, gli istanti di insorgenza/offset sono stati mediati su tutta la popolazione per ciascuna modalità di attivazione e normalizzati rispetto alla

durata del ciclo dell'andatura. Il numero molto elevato di passi considerati nell'analisi ha consentito la valutazione di un nuovo parametro, noto come frequenza di occorrenza.

4.5 OCCURENCE FREQUENCY

La frequenza è una grandezza che riguarda i fenomeni periodici o processi ripetitivi. In statistica, dato un carattere oggetto di rilevazione, si intende per frequenza il numero delle unità statistiche su cui una sua modalità (le modalità sono valori numerici o gli attributi che un carattere può assumere) si presenta. [24] L'Occurrence Frequency di una specifica modalità di attivazione è quantificata dal numero (in percentuale) di passi in cui il muscolo viene reclutato con questa specifica modalità di attivazione, rispetto al numero di passi totali, come riportato nella seguente formula:

$$\text{Occurance Frequency } (n) = \frac{\text{Numero di cicli del passo con } n \text{ intervalli di attivazione}}{\text{Numero totale di cicli del passo}} \times 100$$

Le frequenze di reclutamento muscolare sono correlate a tutta l'attivazione rilevata. [24]

CAPITOLO 5: PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

I dati sono stati ottenuti attraverso la Statistical Gait Analysis che ha evidenziato diverse modalità di attivazione per i due muscoli considerati; gastrocnemio laterale (GL) e tibiale anteriore (TA).

Abbiamo notato che i due muscoli presi in esame, mostrano in maniera significativa le modalità di attivazione seguenti: per il TA due, tre e quattro attivazioni; per il GL una, due e tre attivazioni. Sono state quindi prese in analisi solo le attivazioni sopracitate poiché le altre non prevedevano frequenza significativa (molto bassa, inferiore al 5%). I dati forniti sono stati in primo luogo riportati in modalità grafica. Sono stati rappresentati inizialmente in modo che siano visualizzate separatamente le attivazioni e l'interruzione dei muscoli di competenza per la gamba sinistra e per la gamba destra per ogni paziente analizzato.

Nel seguente grafico viene individuata l'attivazione del muscolo gastrocnemio laterale (GL) nella modalità ad una attivazione nella gamba sinistra e nella gamba destra. È stata calcolata inoltre la deviazione standard che vien riportata in figura con le linee più sottili all'inizio e alla fine dell'attivazione. Questa modalità include, una sola attivazione che copre il ciclo del passo nella sua interezza. Come evidenziato in figura, vi è una elevata variabilità tra soggetti.

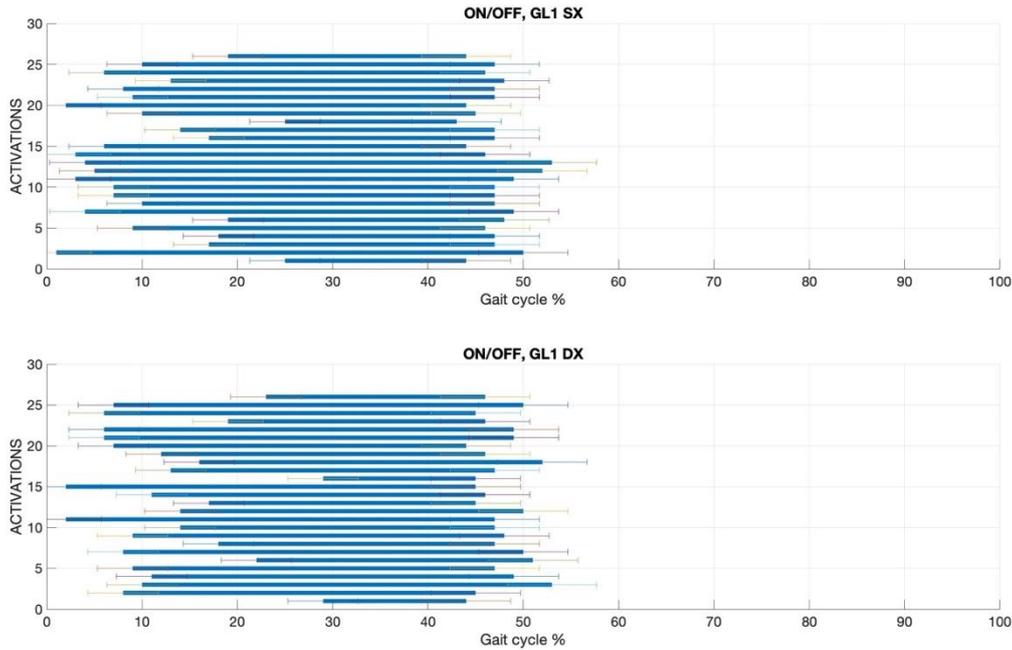


Fig. 5.1: Attivazione del muscolo gastrocnemio laterale (GL) nella modalità ad una attivazione espresso separatamente nella gamba sinistra (sopra) e nella gamba destra (sotto).

Nel seguente grafico viene individuata l'attivazione del muscolo gastrocnemio laterale (GL) nella modalità a due attivazioni nella gamba sinistra e nella gamba destra. È stata calcolata inoltre la deviazione standard che vien riportata in figura con le linee più sottili all'inizio e alla fine dell'attivazione. Questa modalità include due attivazioni: la prima è tipicamente presente nella parte iniziale del ciclo del passo nell'intorno della fase di heel strike, che va dallo 0% al 30% del ciclo del passo; la seconda attivazione copre l'intera fase di swing, partendo dal 50% fino alla fine del ciclo del passo. Come evidenziato in figura, un'elevata variabilità tra soggetti si è riscontrata soprattutto per la seconda attivazione, dove è molto variabile sia l'istante di On che quello di off. Anche le lunghezze delle attivazioni presentano un'elevata variabilità. La prima colonna di entrambi i grafici esprime le percentuali di on/off della prima attivazione, mentre la seconda le percentuali di on/off della seconda attivazione.

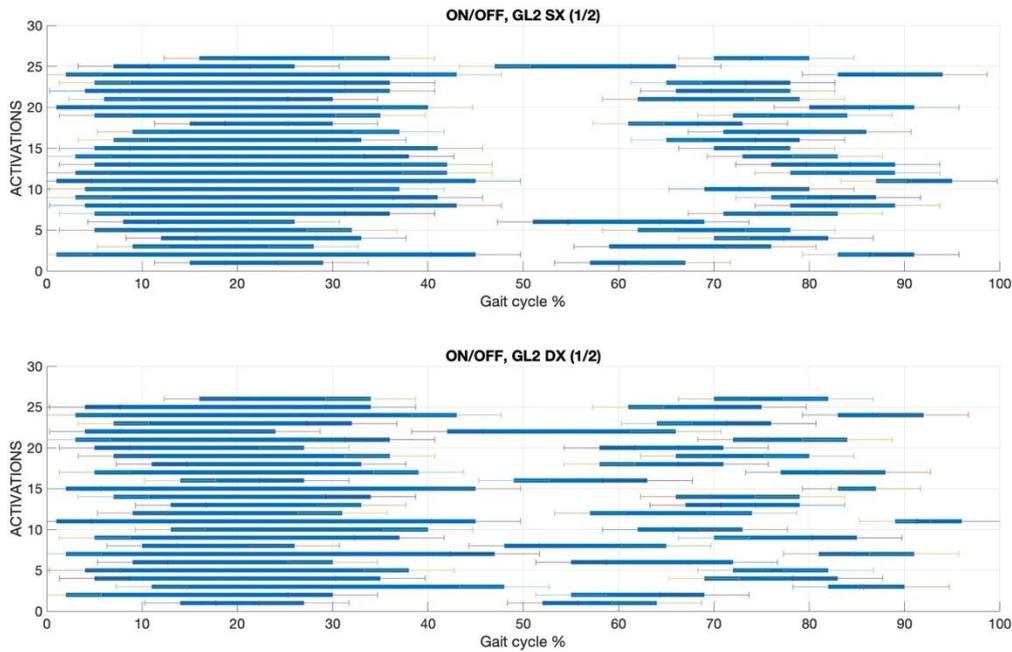


Fig. 5.2: Attivazione del muscolo gastrocnemio laterale (GL) nella modalità a due attivazioni espresso separatamente nella gamba sinistra (sopra) e nella gamba destra (sotto).

Nel seguente grafico viene individuata l'attivazione del muscolo gastrocnemio laterale (GL) nella modalità a tre attivazioni nella gamba sinistra e nella gamba destra. È stata calcolata inoltre la deviazione standard che vien riportata in figura con le linee più sottili all'inizio e alla fine dell'attivazione. Questa modalità include, tre attivazioni: la prima è tipicamente presente nella parte iniziale del ciclo del passo nell'intorno della fase di heel strike, che va dallo 0% al 20% del ciclo del passo; la seconda attivazione chiude la fase di stance fino alla fase di pre-swing, fino al 60% circa del ciclo; la terza attivazione copre la fase di swing fino alla fine del ciclo del passo. Come evidenziato in figura, un'elevata variabilità tra soggetti si è riscontrata per tutte e tre le attivazioni. In particolare, per la prima attivazione si nota che il maggior cambiamento è dato soprattutto dall'istante di off, per la seconda e la terza attivazione, la variabilità è molto elevata sia per l'on che per l'off. Anche le lunghezze delle attivazioni presentano un'elevata variabilità. La prima colonna di entrambi i grafici esprime le percentuali di on/off della prima attivazione, la seconda le percentuali di on/off della seconda attivazione e la terza le percentuali di on/off della terza attivazione.

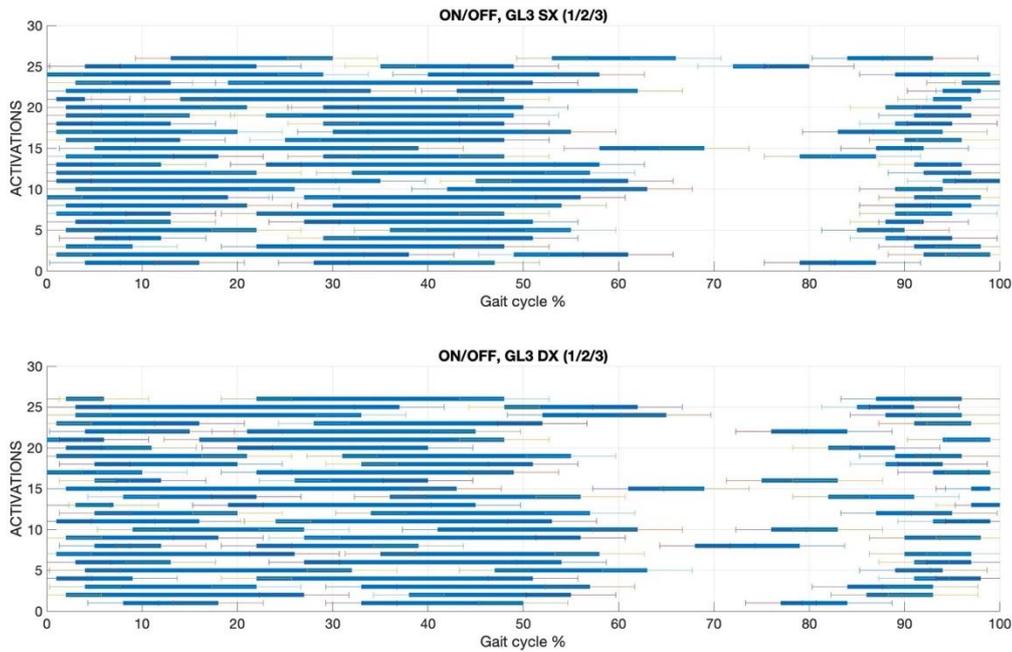


Fig. 5.3: Attivazione del muscolo gastrocnemio laterale (GL) nella modalità a tre attivazioni espresso separatamente nella gamba sinistra (sopra) e nella gamba destra (sotto).

Nel seguente grafico viene individuata l'attivazione del muscolo tibiale anteriore (TA) nella modalità a due attivazioni nella gamba sinistra e nella gamba destra. È stata calcolata inoltre la deviazione standard che vien riportata in figura con le linee più sottili all'inizio e alla fine dell'attivazione. Questa modalità include due attivazioni: la prima è tipicamente presente nella parte iniziale del ciclo del passo nell'intorno della fase di heel strike, che va dallo 0% al 20% del ciclo del passo; la seconda attivazione copre l'intera fase di swing, partendo dal 50% fino alla fine del ciclo del passo. Come evidenziato in figura, un'elevata variabilità tra soggetti si è riscontrata per entrambe le attivazioni. In particolare, per la prima attivazione si nota che il maggior cambiamento è dato soprattutto dall'istante di off, mentre per la seconda attivazione, ciò che varia è principalmente l'istante di on. Anche le lunghezze delle attivazioni presentano un'elevata variabilità, soprattutto per la prima attivazione. La prima colonna di entrambi i grafici esprime le percentuali di on/off della prima attivazione, mentre la seconda le percentuali di on/off della seconda attivazione.

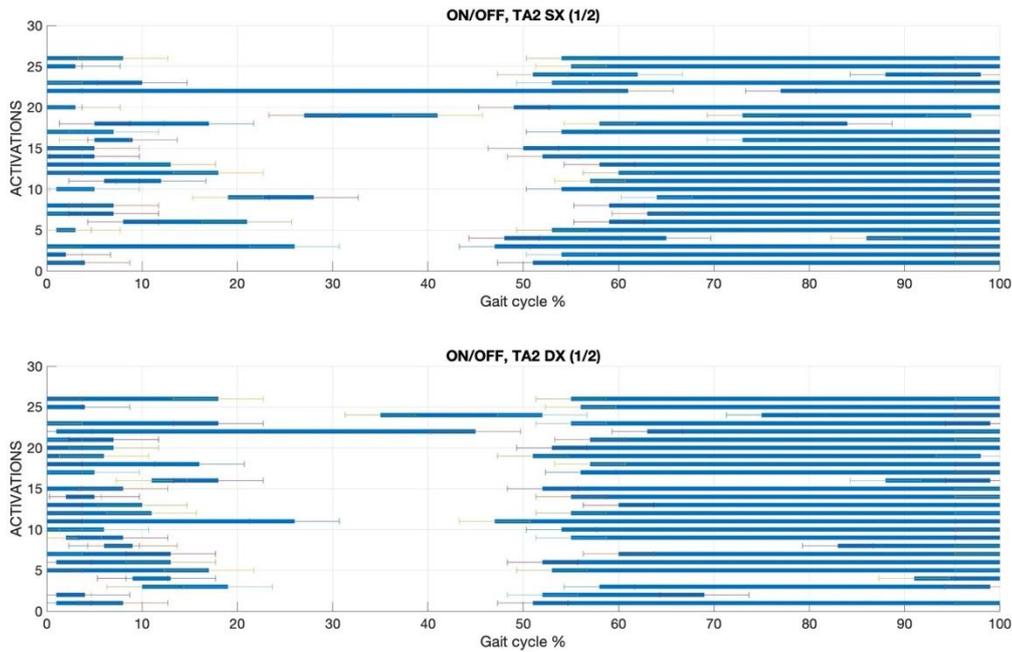


Fig. 5.4: Attivazione del muscolo tibiale anteriore (TA) nella modalità a due attivazioni espresso separatamente nella gamba sinistra (sopra) e nella gamba destra (sotto).

Nel seguente grafico viene individuata l'attivazione del muscolo tibiale anteriore (TA) nella modalità a tre attivazioni nella gamba sinistra e nella gamba destra. È stata calcolata inoltre la deviazione standard che vien riportata in figura con le linee più sottili all'inizio e alla fine dell'attivazione. Questa modalità include, appunto, tre attivazioni: la prima è tipicamente presente nella parte iniziale del ciclo del passo nell'intorno della fase di loading response, che va dallo 0% al 10% circa del ciclo del passo; la seconda attivazione copre la parte finale della fase di stance e l'inizio della fase di swing terminando circa al 60% del ciclo; la terza fase chiude interamente la fase di swing. Come evidenziato in figura, un'elevata variabilità tra soggetti si è riscontrata per tutte e tre le attivazioni. In particolare, per la prima attivazione si nota che il maggior cambiamento è dato soprattutto dall'istante di off, per la seconda attivazione la variabilità di on e off è molto alta, per la terza attivazione ciò che varia è principalmente l'istante di on. Anche le lunghezze delle attivazioni presentano un'elevata variabilità, soprattutto per la prima attivazione. La prima colonna di entrambi

i grafici esprime le percentuali di on/off della prima attivazione, la seconda le percentuali di on/off della seconda attivazione e la terza le percentuali di on/off della terza attivazione.

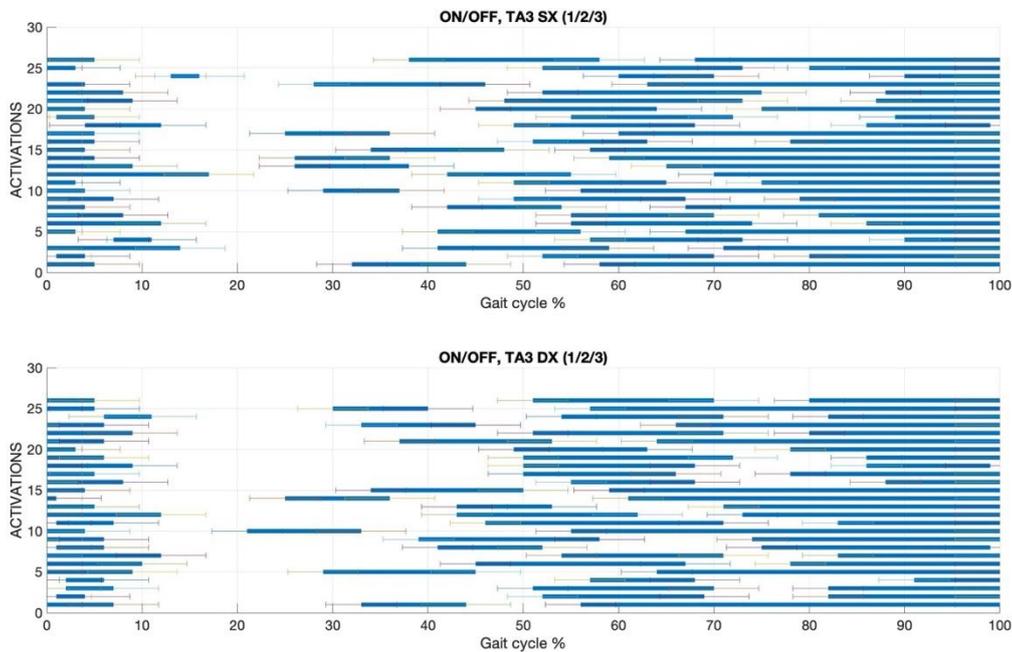


Fig. 5.5: Attivazione del muscolo tibiale anteriore (TA) nella modalità a tre attivazioni espresso separatamente nella gamba sinistra (sopra) e nella gamba destra (sotto).

Nel seguente grafico viene individuata l'attivazione del muscolo tibiale anteriore (TA) nella modalità a quattro attivazioni nella gamba sinistra e nella gamba destra. È stata calcolata inoltre la deviazione standard che vien riportata in figura con le linee più sottili all'inizio e alla fine dell'attivazione. Questa modalità include quattro attivazioni: la prima è tipicamente presente nella parte iniziale del ciclo del passo nell'intorno della fase di loading response, che va dallo 0% al 10% circa del ciclo del passo; la seconda attivazione copre la parte del mid e terminal stance e si chiude intorno al 50% del ciclo del passo; la terza fase inizia con la fase di swing intorno al 60% la quale si chiuderà con la quarta attivazione. Come evidenziato in figura, un'elevata variabilità tra soggetti si è riscontrata per tutte e quattro le attivazioni. In particolare, per la prima attivazione si nota che il maggior cambiamento è dato soprattutto dall'istante di off, per la seconda e terza attivazione la variabilità di on e off è molto elevata mentre per la quarta attivazione ciò che varia è principalmente

l'istante di on. Anche le lunghezze delle attivazioni presentano un'elevata variabilità, soprattutto per la prima attivazione. La prima colonna di entrambi i grafici esprime le percentuali di on/off della prima attivazione, la seconda le percentuali di on/off della seconda attivazione e la terza le percentuali di on/off della terza attivazione, la quarta le percentuali di on/off della quarta attivazione.

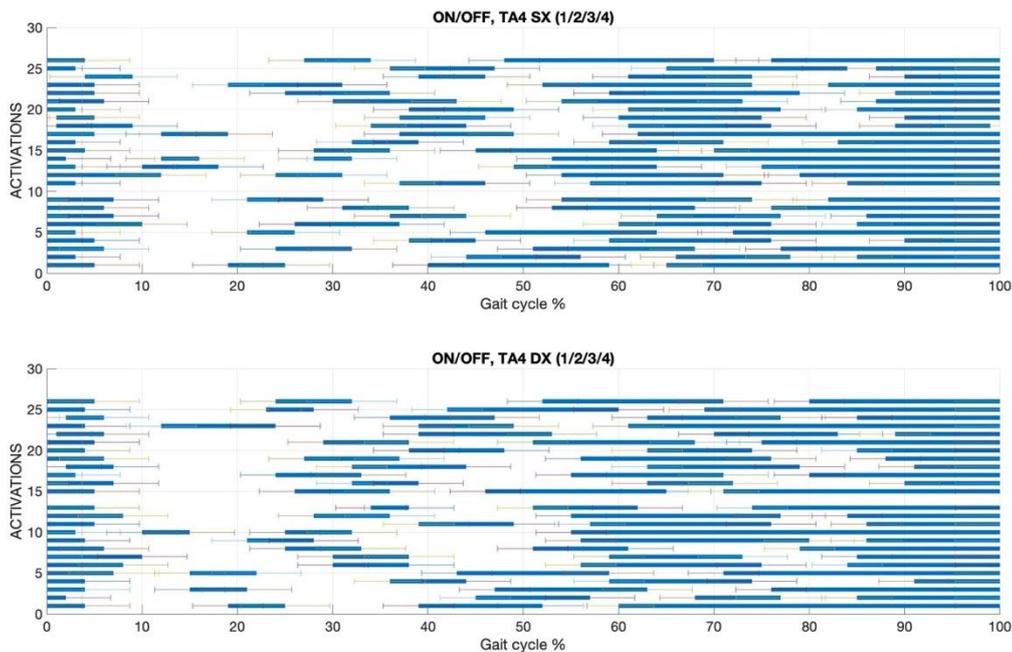


Fig. 5.6: Attivazione del muscolo tibiale anteriore (TA) nella modalità a quattro attivazioni espresso separatamente nella gamba sinistra (sopra) e nella gamba destra (sotto).

Nella seconda parte dello studio sono state effettuate le medie tra on e off della gamba destra e della gamba sinistra per ogni paziente considerato. Quando è risultato possibile sono state individuate dei pattern di attivazione comune che sono stati individuati come cluster (segnati in blu). La loro individuazione è stata possibile eseguendo un processo di intersezione tra valori di on più alti e valori di off più bassi nelle regioni medesime di attivazione per ognuno dei due muscoli considerati. Sono stati eliminati degli outlier che non consentivano in maniera agevole l'individuazione di una zona comune di attività muscolare riferita alla attivazione considerata. Quando la variabilità era troppo alta da impedire l'individuazione di zone comuni di attività del

muscolo in esame, sono state individuate delle macroregioni di attivazione del muscolo, ottenute effettuando un'unione tra il valore di on più basso fino al valore dell'off più alto (segnate in rosso). Il medesimo ragionamento è stato seguito sia per il gastrocnemio laterale (GL) sia per il tibiale anteriore (TA).

Nel seguente grafico vengono individuate le medie tra on e off della gamba destra e sinistra considerate paziente per paziente, considerando la modalità ad una attivazione del gastrocnemio laterale (GL) e un pattern di attivazione comune in cui il GL è attivo in tutti i pazienti considerati. È stata calcolata inoltre la deviazione standard che vien riportata in figura con le linee più sottili all'inizio e alla fine dell'attivazione. A destra troviamo l'individuazione di un pattern di attivazione comune in cui il GL è attivo in tutti i pazienti considerati. Non sono stati individuati outlier. L'Occurance Frequency (%) media per questa attivazione è del 32,97%.

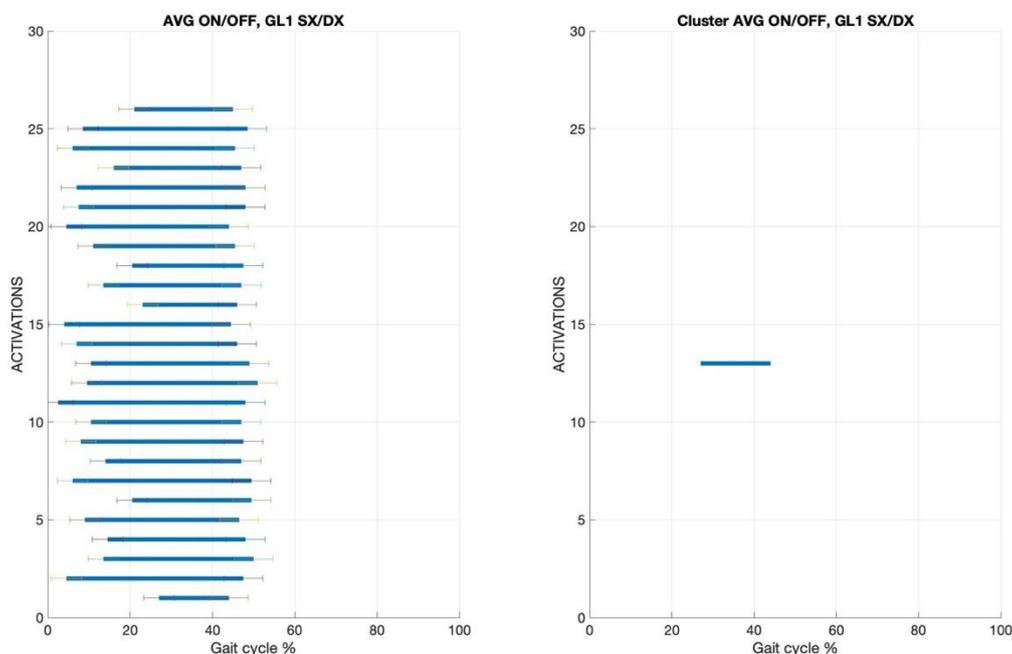


Fig. 5.7: Medie tra on e off della gamba destra e sinistra considerate paziente per paziente (sinistra), considerando la modalità ad una attivazione del gastrocnemio laterale (GL).

Nel seguente grafico sono individuate le medie tra on e off della gamba destra e sinistra considerate paziente per paziente considerando la modalità a due attivazioni del gastrocnemio laterale (GL), un

pattern di attivazione comune in cui il GL è attivo in tutti i pazienti considerati l'individuazione di una macroarea in cui il GL è sempre attivo. È stata calcolata inoltre la deviazione standard che vien riportata in figura con le linee più sottili all'inizio e alla fine dell'attivazione. Nella prima colonna è presente le medie tra on e off dx/sx riferite alla prima attivazione, nella seconda le medie tra on e off dx/sx riferite alla seconda attivazione. A destra troviamo l'individuazione di un pattern di attivazione comune (linea blu) in cui il GL è attivo in tutti i pazienti considerati. Individuazione di una unione tra il minimo valore di on e il massimo valore di off in cui il GL è sempre attivo (linea rossa). Non sono stati individuati outlier. L'Occurance Frequency (%) media per questa attivazione è del 38,84%.

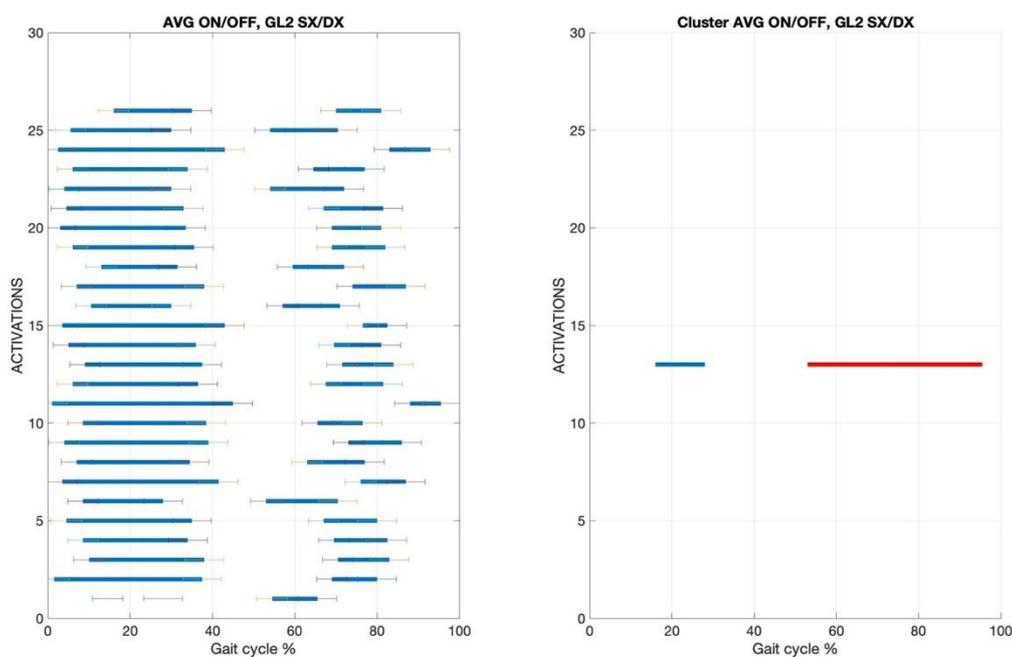


Fig. 5.8: A sinistra, medie tra on e off della gamba destra e sinistra considerate paziente per paziente, considerando la modalità a due attivazioni del gastrocnemio laterale (GL).

Nel seguente grafico sono individuate le medie tra on e off della gamba destra e sinistra considerate paziente per paziente, considerando la modalità a tre attivazioni del gastrocnemio laterale (GL), un pattern di attivazione comune in cui il GL è attivo in tutti i pazienti considerati e l'individuazione di una macroarea in cui il GL è sempre attivo. È stata calcolata inoltre la deviazione standard che vien

riportata in figura con le linee più sottili all'inizio e alla fine dell'attivazione. Nella prima colonna è presente le medie tra on e off dx/sx riferite alla prima attivazione, nella seconda le medie tra on e off dx/sx riferite alla seconda attivazione, nella terza le medie tra on e off dx/sx riferite alla terza attivazione. A destra, individuazione di un pattern di attivazione comune (linea blu) in cui il GL è attivo in tutti i pazienti considerati. Individuazione di una unione tra il minimo valore di on e il massimo valore di off in cui il GL è sempre attivo (linea rossa). Nel mezzo, grafico in cui sono stati eliminati degli outlier che impedivano la corretta creazione di cluster appropriati. Nello specifico, nella prima attivazione sono stati eliminati i pazienti 4, 13, 21; nella seconda attivazione sono stati eliminati i pazienti 2, 15, 24. L'Occurance Frequency (%) media per questa attivazione è del 23,44%.

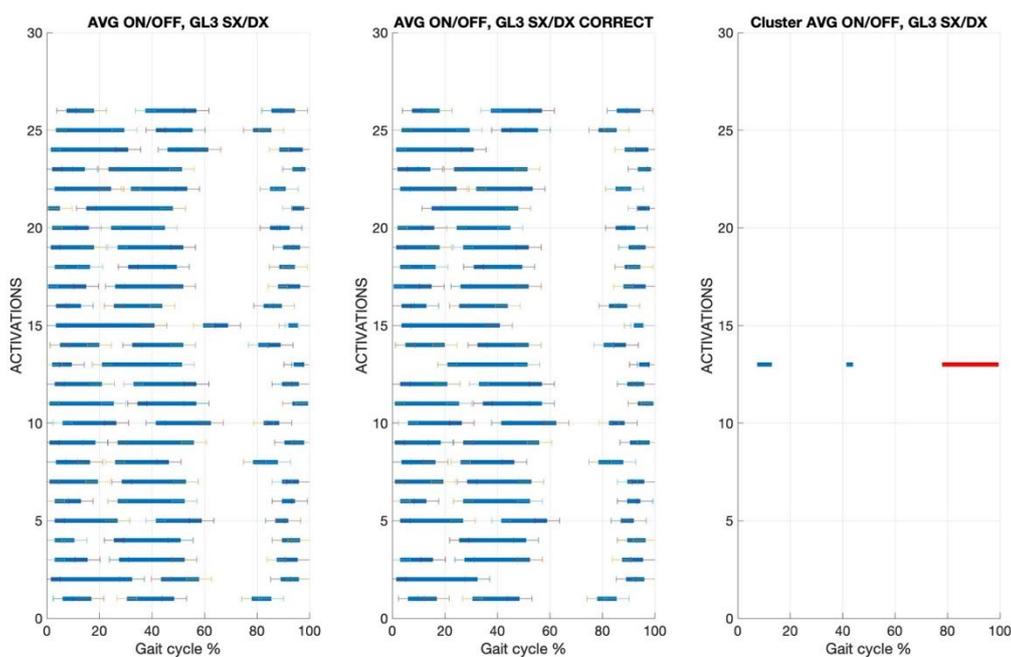


Fig. 5.9: A sinistra, medie tra on e off della gamba destra e sinistra considerate paziente per paziente, considerando la modalità a tre attivazioni del gastrocnemio laterale (GL).

Nel seguente grafico sono individuate le medie tra on e off della gamba destra e sinistra considerate paziente per paziente, considerando la modalità a due attivazioni del tibiale anteriore (TA), un pattern di attivazione comune in cui il TA è attivo in tutti i pazienti considerati e l'individuazione di una macroarea in cui il TA è sempre attivo. È stata calcolata inoltre la deviazione standard che vien

riportata in figura con le linee più sottili all'inizio e alla fine dell'attivazione. Nella prima colonna è presente le medie tra on e off dx/sx riferite alla prima attivazione, nella seconda le medie tra on e off dx/sx riferite alla seconda attivazione. A destra, individuazione di un pattern di attivazione comune (linea blu) in cui il TA è attivo in tutti i pazienti considerati. Individuazione di una unione tra il minimo valore di on e il massimo valore di off in cui il TA è sempre attivo (linea rossa). Nel mezzo, grafico in cui sono stati eliminati degli outlier che impedivano la corretta creazione di cluster appropriati. Nello specifico, nella seconda attivazione sono stati eliminati i pazienti 2, 4, 18. L'Occurance Frequency (%) media per questa attivazione è del 24,63%.

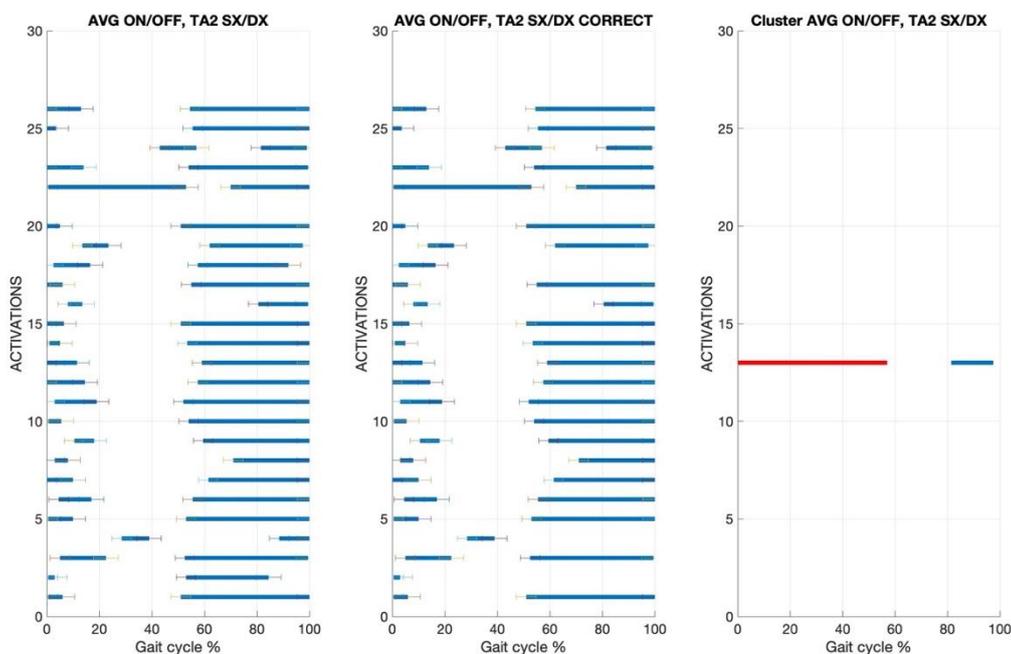


Fig. 5.10: A sinistra, medie tra on e off della gamba destra e sinistra considerate paziente per paziente, considerando la modalità a due attivazioni del tibiale anteriore (TA).

Nel seguente grafico sono individuate le medie tra on e off della gamba destra e sinistra considerate paziente per paziente, considerando la modalità a due attivazioni del tibiale anteriore (TA), un pattern di attivazione comune in cui il TA è attivo in tutti i pazienti considerati e l'individuazione di una macroarea in cui il TA è sempre attivo. È stata calcolata inoltre la deviazione standard che vien riportata in figura con le linee più sottili all'inizio e alla fine dell'attivazione. Nella prima colonna è

presente le medie tra on e off dx/sx riferite alla prima attivazione, nella seconda le medie tra on e off dx/sx riferite alla seconda attivazione, nella terza le medie tra on e off dx/sx riferite alla terza attivazione. A destra, individuazione di un pattern di attivazione comune (linea blu) in cui il TA è attivo in tutti i pazienti considerati. Individuazione di una unione tra il minimo valore di on e il massimo valore di off in cui il TA è sempre attivo (linea rossa). Nel mezzo, grafico in cui sono stati eliminati degli outlier che impedivano la corretta creazione di cluster appropriati. Nello specifico, nella prima attivazione sono stati eliminati i pazienti 4, 18, 24. L'Occurance Frequency (%) media per questa attivazione è del 40%.

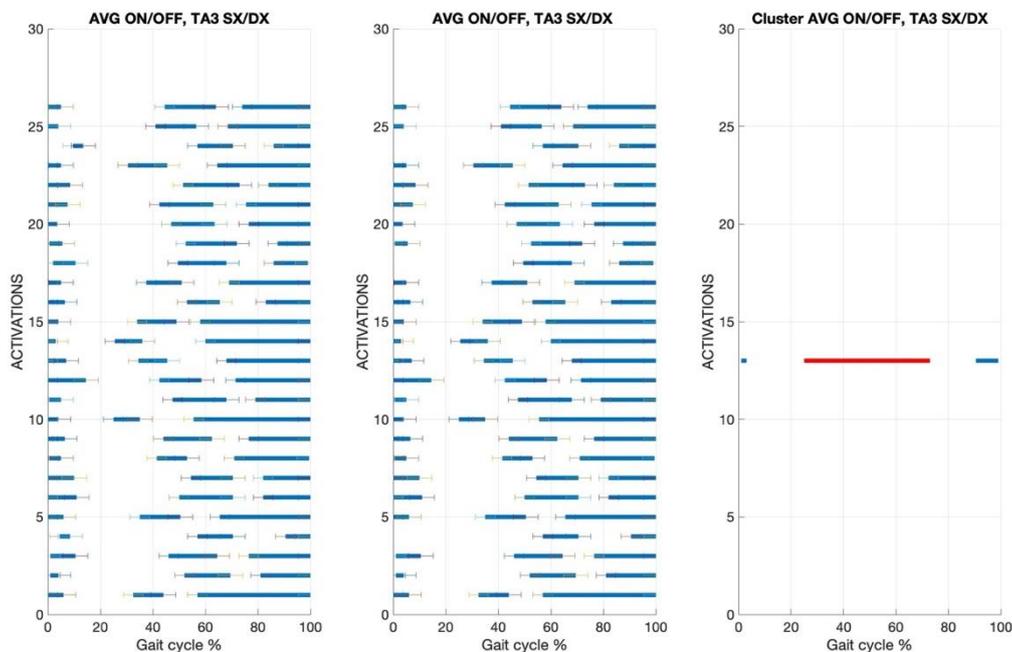


Fig. 5.11: A sinistra, medie tra on e off della gamba destra e sinistra considerate paziente per paziente, considerando la modalità a tre attivazioni del tibiale anteriore (TA).

Nel seguente grafico sono individuate le medie tra on e off della gamba destra e sinistra considerate paziente per paziente, considerando la modalità a quattro attivazioni del tibiale anteriore (TA), un pattern di attivazione comune in cui il TA è attivo in tutti i pazienti considerati e l'individuazione di una macroarea in cui il TA è sempre attivo. Nella prima colonna è presente le medie tra on e off dx/sx riferite alla prima attivazione, nella seconda le medie tra on e off dx/sx riferite alla seconda

attivazione, nella terza le medie tra on e off dx/sx riferite alla terza attivazione, nella quarta le medie tra on e off dx/sx riferite alla quarta attivazione. A destra, individuazione di un pattern di attivazione comune (linea blu) in cui il TA è attivo in tutti i pazienti considerati. Individuazione di una unione tra il minimo valore di on e il massimo valore di off in cui il TA è sempre attivo (linea rossa). Per facilità di visualizzazione, la linea rossa più alta indica la seconda attivazione, mentre quella più bassa la terza attivazione. Nel mezzo, grafico in cui sono stati eliminati degli outlier che impedivano la corretta creazione di cluster appropriati. Nello specifico, nella prima attivazione sono stati eliminati i pazienti 2, 17, 24. L'Occurance Frequency (%) media per questa attivazione è del 24,76%

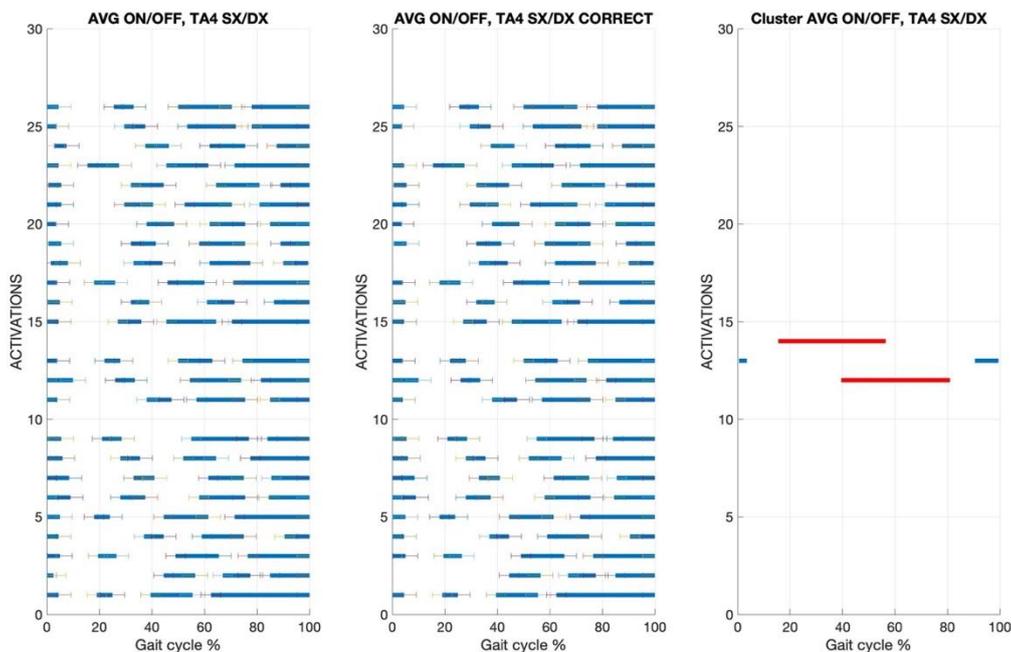


Fig. 5.12: A sinistra, medie tra on e off della gamba destra e sinistra considerate paziente per paziente, considerando la modalità a quattro attivazioni del tibiale anteriore (TA).

Di seguito viene riportato il confronto delle varie modalità di attivazione per il gastrocnemio laterale (GL). Ogni modalità di attivazione è stata posta su righe differenti per una più semplice visualizzazione del confronto tra di esse. Sulla prima riga è stata individuata l'attività del muscolo secondo la modalità ad una attivazione. Sulla seconda riga è stata individuata l'attività del muscolo secondo la modalità a due attivazioni. Sulla terza riga è stata individuata l'attività del muscolo

secondo la modalità a tre attivazioni. Linea blu: prima attivazione; linea verde: seconda attivazione; linea viola: terza attivazione. Dove non è stato possibile effettuare un cluster è stato riportato il termine unione che individua il minimo valore di on e il massimo valore di off considerato per l'attivazione corrispondente.

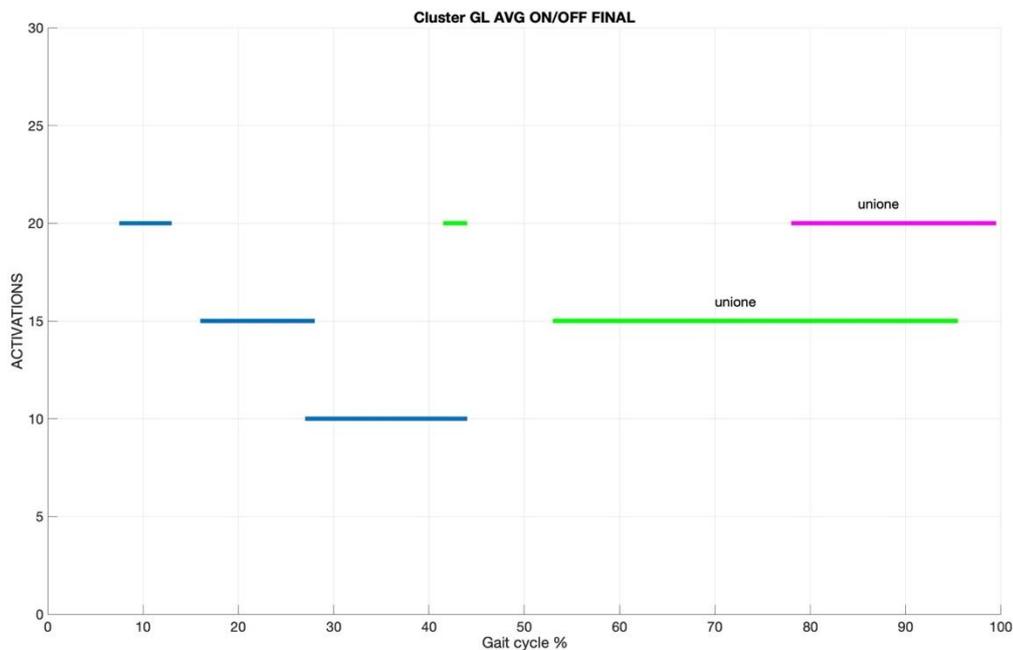


Fig 5.13: Confronto tra le diverse modalità di attivazione del muscolo gastrocnemio laterale (GL).

Di seguito viene riportato il confronto delle varie modalità di attivazione per il tibiale anteriore (TA). Ogni modalità di attivazione è stata posta su righe differenti per una più semplice visualizzazione del confronto tra di esse. Sulla prima riga è stata individuata l'attività del muscolo secondo la modalità ad una attivazione. Sulla seconda riga è stata individuata l'attività del muscolo secondo la modalità a due attivazioni. Sulla terza riga è stata individuata l'attività del muscolo secondo la modalità a tre attivazioni. Sulla quarta riga è stata individuata l'attività del muscolo secondo la modalità a quattro attivazioni. Per facilità di visualizzazione, nella modalità a quattro attivazioni la linea verde più alta indica la seconda attivazione, mentre quella viola più bassa la terza attivazione. Linea blu: prima attivazione; linea verde: seconda attivazione; linea viola: terza attivazione; linea

nera: quarta attivazione. Dove non è stato possibile effettuare un cluster è stato riportato il termine unione che individua il minimo valore di on e il massimo valore di off considerato per l'attivazione corrispondente

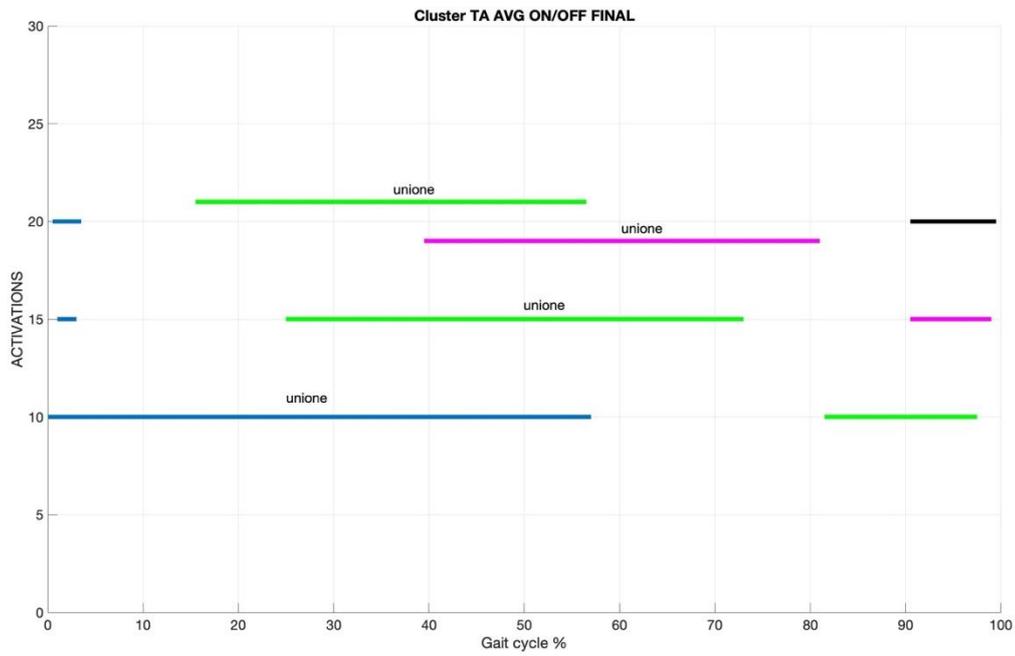


Fig 5.14 : Confronto tra le diverse modalità di attivazione del muscolo tibiale anteriore (TA).

CAPITOLO 6: DISCUSSIONI E CONCLUSIONI

Il presente lavoro è stato progettato con l'obiettivo di proporre un approccio statistico basato sulla statistical gait analysis che evidenzia un possibile pattern comune tra le diverse modalità di attivazione di uno specifico muscolo durante il cammino di soggetti sani.

La Statistical Gait Analysis ha evidenziato la presenza di diverse modalità di attivazione per i due muscoli considerati; gastrocnemio laterale (GL) e tibiale anteriore (TA). In particolare, il TA ha presentato tre diverse modalità di attivazione, caratterizzate da due attivazioni (Fig. 5.4), tre attivazioni (Fig. 5.5) e quattro attivazioni (Fig. 5.6), rispettivamente. Il tibiale anteriore inizia la sua attivazione nella fase finale della pre-oscillazione per poi intensificarsi durante l'oscillazione iniziale per effettuare il sollevamento del piede. Il movimento limitato che ne consegue è tuttavia dovuto all'inerzia che deve essere superata. L'azione dei muscoli pretibiali appare vivace anche nelle ultime due fasi dell'oscillazione per assicurare la continuazione della flessione dorsale della tibiotarsica e il posizionamento del piede per l'azione di rotolamento. Nel contatto iniziale il tibiale anteriore stabilizza l'articolazione tibiotarsica, frenando la velocità di flessione plantare passiva e consentendo la progressione durante la risposta al carico [24].

Analogamente, il GL ha presentato tre diverse modalità di attivazione, caratterizzate da una singola attivazione (Fig. 5.1), due attivazioni (Fig. 5.2) e tre attivazioni (Fig. 5.3), rispettivamente. L'attività del gastrocnemio inizia con un ritardo di circa il 6% del ciclo del passo rispetto al soleo. È finalizzata alla flessione plantare del piede e contribuisce a ruotarlo internamente. Partecipa, inoltre, anche alla flessione della gamba (essendo, a differenza del soleo, un muscolo biarticolare). Con la sua contrazione interviene all'inizio della preoscillazione, contribuendo all'elevazione del tallone da terra. [24]

Questo lavoro è stato effettuato prendendo in considerazione nello specifico 26 soggetti sani di cui abbiamo preso in considerazione in origine quelli che erano i singoli passi compiuti con la gamba destra e con la gamba sinistra in maniera separata. I risultati di questa analisi vengono riportati nelle fig. dal 5.1 al 5.3 per il gastrocnemio laterale e nelle fig. 5.4 al 5.6 per il tibiale anteriore. Abbiamo notato che considerando in maniera separata i passi effettuati dalla gamba destra e dalla sinistra, la variabilità delle attivazioni muscolari nella regione che intendevamo studiare fosse già da principio particolarmente elevata. Di conseguenza, si è andati a studiare anche la variabilità del valor medio degli on e gli off tra gamba destra e gamba sinistra, effettuata paziente per paziente. Questo ci ha permesso di notare una riduzione sensibile della variabilità. Il possibile pattern comune tra i 26 soggetti e, eventualmente, tra le diverse modalità di attivazione medie è stato calcolato come l'intersezione tra gli intervalli di attivazione medi dei soggetti nella specifica regione considerata. Questo è infatti denotabile da quanto viene riportato nei grafici dal 5.7 al 5.12, nello specifico nei primi grafici a sinistra. Talvolta è stato poi necessario dover identificare degli outlier che abbiamo eliminato per far sì che fosse possibile tentare di creare una intersezione tra i pazienti considerati. È infatti stato necessario nello specifico non considerare: nella prima attivazione della modalità a tre attivazioni del Gastrocnemio Laterale (GL) sono stati eliminati i pazienti 4, 13, 21; nella seconda attivazione sono stati eliminati i pazienti 2, 15, 24. (fig. 5.9); nella seconda attivazione della modalità a due attivazioni del Tibiale Anteriore (TA) sono stati eliminati i pazienti 2, 4, 18 (fig. 5.10); nella prima attivazione della modalità a tre attivazioni del Tibiale Anteriore (TA) sono stati eliminati i pazienti 4, 18, 24 (fig. 5.11); nella prima attivazione della modalità a quattro attivazioni del Tibiale Anteriore (TA) sono stati eliminati i pazienti 2, 17, 24 (fig. 5.12). L'eliminazione di queste casistiche specifiche, che si discostavano in maniera importante dalle altre osservazioni disponibili, ci ha permesso di procedere con la creazione di intersezioni tra i pazienti, per individuare una regione di

comune interesse che riguardasse uno specifico momento in cui il muscolo, nelle varie modalità di attivazione, risulti sempre attivo.

Nelle fig. dalla 5.7 alla 5.12, tutte le linee in blu stanno a identificare una intersezione tra i dati considerati, cioè quella regione di grafico compresa tra il valore di on maggiore il valore di off minore individuato tra i soggetti esaminati. Non sempre però abbiamo riscontrato successo nel tentativo di effettuare tale intersezione, poiché in molti casi la variabilità dell'atto motorio preso in esame era troppo alta, tanto da dover essere costretti ad abbandonare il tentativo di trovare una regione comune tra pazienti. Di conseguenza, si è cercato di individuare una regione caratterizzata dal valore di on minore e dal valore di off maggiore per la specifica attivazione, che abbiamo invece chiamato unione, identificata dalle linee rosse nelle figure precedenti. In queste regioni sicuramente il muscolo risulta attivo per il compimento del task motorio, ma la variabilità tende ad essere molto elevata nel momento in cui si modifica il passo nei movimenti e nella postura delle parti anatomiche che contribuiscono al ciclo (gamba, piede, caviglia) la cui variabilità potrebbe indicare un maggiore rischio di caduta, fragilità, deviazioni nella funzione muscolare e nel controllo posturale

Nelle figure successive (fig. 5.13 e fig. 5.14) è evidenziata la relazione che intercorre tra le varie modalità di attivazione e dei relativi cluster e macroaree che abbiamo identificato per i due muscoli. In conclusione, la presente tesi ha dimostrato come sia il tibiale anteriore che il gastrocnemio laterale presentino una regione comune di attività in tutti i soggetti considerati, che dipende dalla funzione fisiologica del muscolo in quella specifica fase del passo. Ciononostante, i pattern di attivazione variano molto da soggetto a soggetto, rendendo così possibile evidenziare un'intersezione comune a tutti i soggetti solo per alcune attivazioni specifiche di ogni modalità di attivazione, ma non per tutte. Questi risultati evidenziano quindi che i muscoli flessori della caviglia presentano, durante il cammino di soggetti sani, delle regioni di attivazione funzionali al compito motorio, ma che all'interno di queste regioni è presente un'elevata variabilità tra soggetti degli

istanti di attivazione e disattivazione, che aumenta all'aumentare della durata del compito motorio analizzato.

7: BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] Sutherland DH. The evolution of clinical gait analysis part I: kinesiological EMG. *Gait Posture*. 2001 Jul;14(1):61-70.
- [2] Staude G, Flachenecker C, Daumer M, Wolf W. Onset detection in surface electromyographic signals: a systematic comparison of methods. *EURASIP J Appl Signal Process* 2001;2:67–81.
- [3] Agostini V, Nascimbeni A, Gaffuri A, Imazio P, Benedetti MG, Knaflitz M. Normative EMG activation patterns of school-age children during gait. *Gait Posture*. 2010 Jul;32(3):285-9.
- [4] D. M. Bojanic et al., "Quantification of dynamic EMG patterns during gait in children with cerebral palsy", *J Neurosci Methods*, vol. 198, pp. 325–331, 2011
- [5] Di Nardo F, Ghetti G, Fioretti S. Assessment of the activation modalities of gastrocnemius lateralis and tibialis anterior during gait: a statistical analysis. *J Electromyogr Kinesiol*. 2013 Dec;23(6):1428-33.
- [6] <https://www.my-personaltrainer.it/fisiologia/fisiologia-muscolare.html>
- [7] *Cellula e Tessuti*, R. Colombo, E. Olmo, Edi-Ermes, 2014, Milano, 154-159
- [8] *Anatomia Umana*, Kenneth S. Saladin, Piccin, 2012, Padova, 244-250
- [9] *Fondamenti di Meccanica e Biomeccanica del Movimento*, G. Legnani, G. Palmieri, CittàStudi Edizioni, Milano 2016, 493-498
- [10] <https://www.studiomedicodeiuliis.it/elettromiografia-2/>
- [11] Agostini, V.; Nascimbeni, A.; Gaffuri, A.; Knaflitz, M. Multiple gait patterns within the same Winters class in children with hemiplegic cerebral palsy. *Clin. Biomech*. 2015, 30, 908–914.
- [12] Pathokinesiology Department, Physical Therapy Department: *Observational Gait Analysis Handbook*. Downey, CA, The Professional Staff Association of Rancho Los Amigos Medical Centre, 1989.
- [13] <https://www.sportsshoes.com/it-it/analisi-dell-andatura/>
- [14] Winter, D.A. *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, 2nd ed.; Wiley: New York, NY, (5) USA, 1990.
- [15] <http://www.poliambulatoriomodus.it/approfondimenti/18-documenti/65-la-caviglia>

- [16] <https://www.fisiohumana.it/articoli-fisioterapia/dorsiflessione-analisi-possibili-lesioni-esercizi-fisioterapici>
- [17] <https://www.corpoumano.net/muscolo-tibiale-anteriore/>
- [18] <https://www.statigeneraliricercasanitaria.it/infiammazione-del-tibiale-anteriore-ruolo-della-fisioterapia-mirata/>
- [19] Hutton WC, Dhanendran M, A study of the distribution of load under the normal foot during walking, Int Orthop, 153-157,1979
- [20] <https://medicinaonline.co/2019/04/21/muscolo-gastrocnemio-gemelli-anatomia-funzioni-patologie-in-sintesi/>
- [21] Fisiologia Medica, Artur C. Guyton, John E. Hall, 2011, Masson, 1011-1013
- [22] V. Agostini, M. Knaflitz, An algorithm for the estimation of the signal-to-noise ratio in surface myoelectric signals generated during cyclic movements, IEEE Trans. Biomed. Eng. 59 (2012) 219–225.
- [23] [http://portale.siva.it/files/doc/library/corso ta occhi 01 ortdeam%20\(1\).pdf](http://portale.siva.it/files/doc/library/corso ta occhi 01 ortdeam%20(1).pdf)
- [24] <http://chinesiogroup.it/cammino-fasi-analisi-ed-elettromiografia/>
- [25] <https://boneandspine.com/normal-gait-cycle/>

RINGRAZIAMENTI

Ci tengo a ringraziare in primo luogo il correlatore di questa tesi, il Professor Francesco Di Nardo, per essere sempre stato disponibile, cortese e affidabile nell'avermi accompagnato nella stesura di questo lavoro.

Ringrazio la mia famiglia, mamma, papà e Claudia, per non avermi mai lasciato solo durante questo percorso, per aver affrontato ogni momento, gradevole e meno, con me e per me. Grazie a voi per avermi sempre genuinamente consigliato, per avermi spronato a dare sempre il massimo e a non mollare mai, per avermi aiutato a trovare la mia strada anche quando questa sembrava buia di fronte a me e a voi.

Ringrazio tutti i miei amici. A quelli di una vita, per aver sempre creduto in me tanto quanto io credo in voi. Grazie per avermi accompagnato con una risata, uno scherzo, una battuta, un pensiero. Grazie di essere rimasti sempre al mio fianco. Vi voglio bene.

Voglio ringraziare con affetto quelli che hanno condiviso questo percorso con me e che più di tutti sanno quanto è stata dura. Un ringraziamento ai miei amici, colleghi, e compagni di corso, per tutti i pomeriggi di studio (o presunto tale), per i bei momenti passati insieme, per i consigli e le parole di conforto; alle mie coinquiline che mi hanno aiutato in ogni momento di difficoltà e che hanno sempre mostrato stima e affetto verso di me.

Grazie a tutti quelli che, presto o tardi, sono entrati a far parte della mia vita. Questo è per voi, per noi, per me.

We made it.

Andrea