



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Biomedica

**ANTAGONISMO E SINERGIA DEI MUSCOLI COINVOLTI NEL MANTENIMENTO DELLA
STABILITÀ DELL'ARTICOLAZIONE DEL GINOCCHIO DURANTE IL CAMMINO ADULTO**

**Antagonism and synergy of muscular recruitment for knee-joint stability during
walking**

Relatore:

Prof. Francesco Di Nardo

Tesi di Laurea di:

Cecilia Petruccelli

Correlatore:

Prof. Sandro Fioretti

A.A. 2019 / 2020

Indice

Introduzione	3
2. La contrazione e la co-contrazione muscolare	6
2.1 Tessuto muscolare.....	6
2.1.1 Tessuto muscolare scheletrico striato	7
2.1.1.1 Tipi di fibre muscolari	8
2.1.2 Tessuto muscolare striato cardiaco	10
2.1.3 Tessuto muscolare liscio	10
2.2 La contrazione del muscolo scheletrico	11
2.2.1 Le proteine contrattili del muscolo scheletrico	11
2.2.2 Fisiologia della contrazione muscolare	12
2.2.3 Tipologie di contrazione muscolare	14
2.2.4 Co-contrazione muscolare	15
2.3 Fisiologia-anatomia del ginocchio.....	16
2.3.1 Articolazione del ginocchio.....	16
2.3.2 Gruppi muscolari	17
2.3.3 Movimenti dell'articolazione	21
3. Gait Analysis	22
3.1 Gait cycle	22
3.2 Fasi del passo	23
3.2.1 Funzioni dell'intero arto inferiore durante il passo	26
3.3 Attivazione muscolare durante il cammino	32
3.3.1 Controllo muscolare nella fase di appoggio.....	32
3.3.2 Controllo muscolare nella fase di oscillazione.....	34
4. Materiali e metodi	37
4.1 Soggetti	37
4.2 Acquisizione del segnale.....	37
4.3 Processing del segnale	38

4.4 Statistical gait analysis	39
4.5 Statistica	40
5. Risultati.....	42
6. Discussione	53
Bibliografia	57

Introduzione

Il reclutamento concomitante di muscoli agonisti e antagonisti che attraversano un'articolazione è nota come co-attivazione muscolare [1]. Questo meccanismo fisiologico è stato identificato sia nelle popolazioni sane che in quelle patologiche [2, 3]. Nei soggetti abili, le co-attivazioni si verificano per ottenere una pressione omogenea sulla superficie articolare, preservando la stabilità articolare [4]. Nei soggetti patologici, ad esempio in quelli che sono affetti da instabilità cronica articolare o che soffrono di lesioni ai legamenti, le co-attivazioni sembrano avere un ruolo chiave nelle strategie di compensazione migliorando la stabilità articolare [5-7]. Ciò è risultato particolarmente vero per l'articolazione del ginocchio [8-10], considerando il suo ruolo nella catena cinematica degli arti inferiori e il suo elevato tasso di lesioni, in gran parte correlate a rotture del legamento crociato anteriore [11]. L'articolazione del ginocchio è il risultato di una complessa interazione di forze e coppie passive e attive, non solo durante le impegnative attività motorie di massimo sforzo [12, 13], ma anche durante attività tipiche della vita quotidiana come il cammino [14].

Nel cammino, il ginocchio è principalmente regolato dal gruppo del quadricipite femorale (QF) e dai tendini che hanno una funzione di scarico, aumentando la flessione del ginocchio. Il QF controlla l'estensione dell'articolazione, ottenendo così una coppia agonista-antagonista per il ginocchio. Le co-attivazioni tra i tendini e il QF sono state ben riconosciute come una strategia efficace per preservare la stabilità del ginocchio durante la deambulazione [15]. Inoltre, sono stati studiati anche i muscoli che compongono il tricipite della sura, il gastrocnemio e il soleo, per quanto riguarda il loro effetto sull'articolazione del ginocchio [12]. In particolare, il gastrocnemio che si inserisce nel calcagno, esercita un'attività di flessione diretta sull'articolazione del ginocchio [10].

Nel corso degli anni, l'influenza del gastrocnemio sulla cinematica del ginocchio ha ricevuto un notevole interesse. Molti lavori hanno indagato sull'attività del gastrocnemio per l'allungamento del legamento crociato anteriore (anterior cruciate ligament, ACL), riportando una chiara funzione come antagonista [12, 16-18]. Inoltre, la co-attivazione del gastrocnemio è riconosciuta come un meccanismo fondamentale per la stabilità del ginocchio e per la riduzione del carico su ACL [8, 18]. Questa co-attivazione è già stata valutata in diversi compiti motori in cui è stato ampiamente confermato che, durante la fase di atterraggio del piede al terreno, il ginocchio risulta essere stabilizzato dai movimenti di abduzione dovuti ai carichi assiali, invece i movimenti rotazionali sono piccoli e contribuiscono poco alla tensione su ACL evidenziando che il rischio di lesioni di ACL durante il cammino su una singola gamba dipende anche da muscoli che non partecipano all'estensione del ginocchio come il soleo [12, 13, 19]. La comprensione della meccanica del ginocchio durante l'andatura e la valutazione di come l'attività muscolare influenza le strategie dinamiche del ginocchio rappresentano temi di ampio interesse [17, 20-24]. La valutazione dell'attività di co-attivazione tra il gastrocnemio laterale e il vasto laterale durante il cammino è stata già studiata per l'articolazione del ginocchio per valutarne la stabilità associandola agli angoli di estensione dell'articolazione [25].

L'effetto del genere sulle co-contrazioni dei muscoli degli arti inferiori è stato più volte preso in considerazione in letteratura. Lavori precedenti hanno studiato le differenze tra i maschi e le femmine nelle co-contrazioni tra il VL e MH [26] e tra TA e GL [27] evidenziando un reclutamento delle co-attivazioni maggiore nelle donne per la stabilità del ginocchio. In un lavoro su donne patologiche con osteoartrosi unilaterale, è stata notata un'attivazione significativamente inferiore del vasto laterale e una maggiore co-contrazione muscolare del ginocchio della gamba interessata rispetto alla stessa gamba non affetta da patologia [28]. L'effetto del genere risulta quindi essere

non trascurabile nella spiegazione degli effetti sul cammino del reclutamento contemporaneo dei due muscoli antagonisti. Tuttavia, a nostra conoscenza, nessuno studio precedente ha preso in considerazione le possibili differenze di co-attivazione tra questi due muscoli nel genere maschile e femminile durante la camminata, con l'obiettivo di comprendere se modifiche del pattern di co-attivazione dovute al genere possano influenzare possibili infortuni, come per esempio la rottura dell'ACL.

Questo lavoro di tesi ha, quindi, l'obiettivo di identificare le possibili differenze legate al genere delle co-contrazioni tra il gastrocnemio laterale (GL) e il vasto laterale (VL) per la stabilità del ginocchio durante il cammino. In questo studio, le co-attivazioni sono state valutate non solo in termini di intervalli temporali di co-contrazione, ma anche in termini di frequenza di reclutamento OCF, cioè il numero di passi in cui è stata rilevata simultanea l'attività muscolare, normalizzato al numero di passi totale [29]. Ciò ha permesso di quantificare la ricorrenza di ogni co-contrazione nei soggetti di sesso maschile e femminile durante l'intera prova di camminata, al fine di comprendere meglio le eventuali differenze tra i due sessi nel controllo muscolare dell'articolazione del ginocchio. Nel presente lavoro di tesi, un numero elevato di passi è stato considerato per ogni soggetto (circa 500 passi), per tenere conto dell'elevata variabilità dell'attivazione muscolare durante il cammino.

2. La contrazione e la co-contrazione muscolare

2.1 Tessuto muscolare

Un muscolo è un tessuto che, se opportunamente stimolato da una terminazione nervosa, è in grado di contrarsi e quindi di compiere un lavoro. La caratteristica peculiare del tessuto muscolare è proprio la sua capacità contrattile, oltre a quella di allungarsi oltre le dimensioni che hanno a riposo e di aumentare di massa o di numero. Nell'uomo si identificano tre tipi di tessuto muscolare (Figura 1):

- a) tessuto muscolare scheletrico striato;
- b) tessuto muscolare liscio;
- c) tessuto muscolare striato cardiaco.

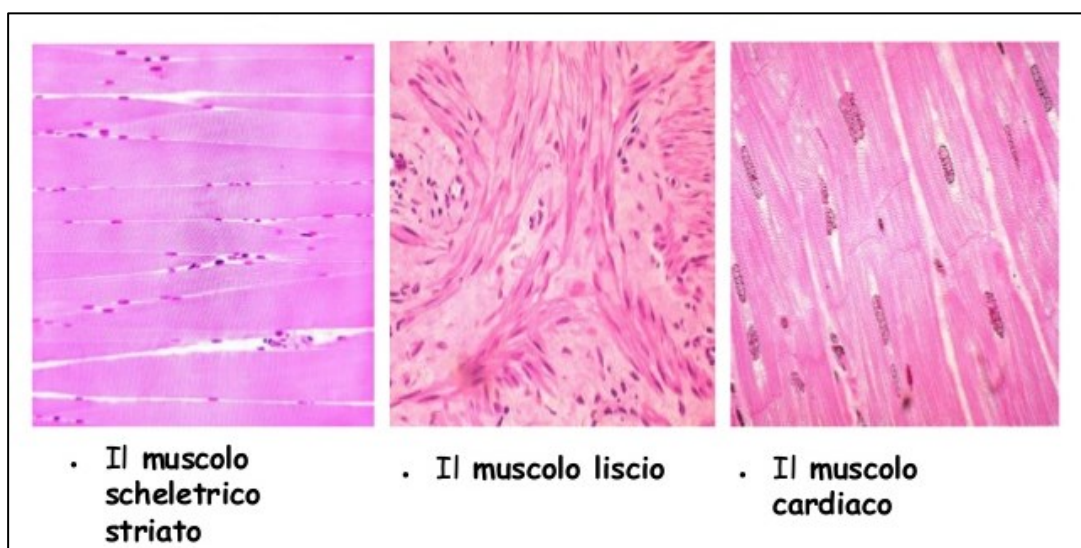


Figura 1. Principali tipi di tessuto muscolare

2.1.1 Tessuto muscolare scheletrico striato

Il tessuto muscolare scheletrico comprende tutti i muscoli che consentono il movimento dello scheletro e quindi il movimento del corpo nello spazio ma svolgono un ruolo chiave anche nella respirazione e nel sostegno dei visceri proteggendoli da traumi esterni.

Il muscolo scheletrico è costituito da migliaia di cilindri lunghi da 1 mm a 20 cm e con diverso diametro, le *fibre muscolari*, che sono disposte in parallelo. All'interno di ciascuna fibra muscolare sono presenti delle proteine contrattili organizzate in microfilamenti, a loro volta costituenti fasci detti *miofibrille* anch'esse disposte in parallelo [30]. A causa della particolare organizzazione delle miofibrille, il sarcoplasma delle fibre muscolari se osservato in maniera longitudinale mostra un'alternanza di bande chiare e scure. Al centro di ogni banda chiara (banda I) è presente una sottile stria scura (linea Z), mentre al centro di ogni banda scura (banda A) vi è una sottile stria chiara (linea H) con al centro un ulteriore sottile stria scura (linea M). La striatura risulta comprensibile se si considera che ogni fibra muscolare può essere suddivisa in tanti elementi successivi detti *sarcomeri*, ciascuno dei quali rappresenta l'unità funzionale della fibra muscolare stessa. Il sarcomero è una regione compresa tra due linee Z. Una singola miofibrilla è formata da filamenti spessi e sottili. I filamenti spessi sono composti principalmente dalla proteina actina e sono uniti tra loro da ponti trasversali in corrispondenza della linea Z. I filamenti sottili sono costituiti dalla miosina e occupano la banda A. La linea H risulta più chiara perché costituita solo da filamenti spessi; la linea M, invece, risulta più scura perché in essa si trovano connessioni trasversali tra filamenti spessi.

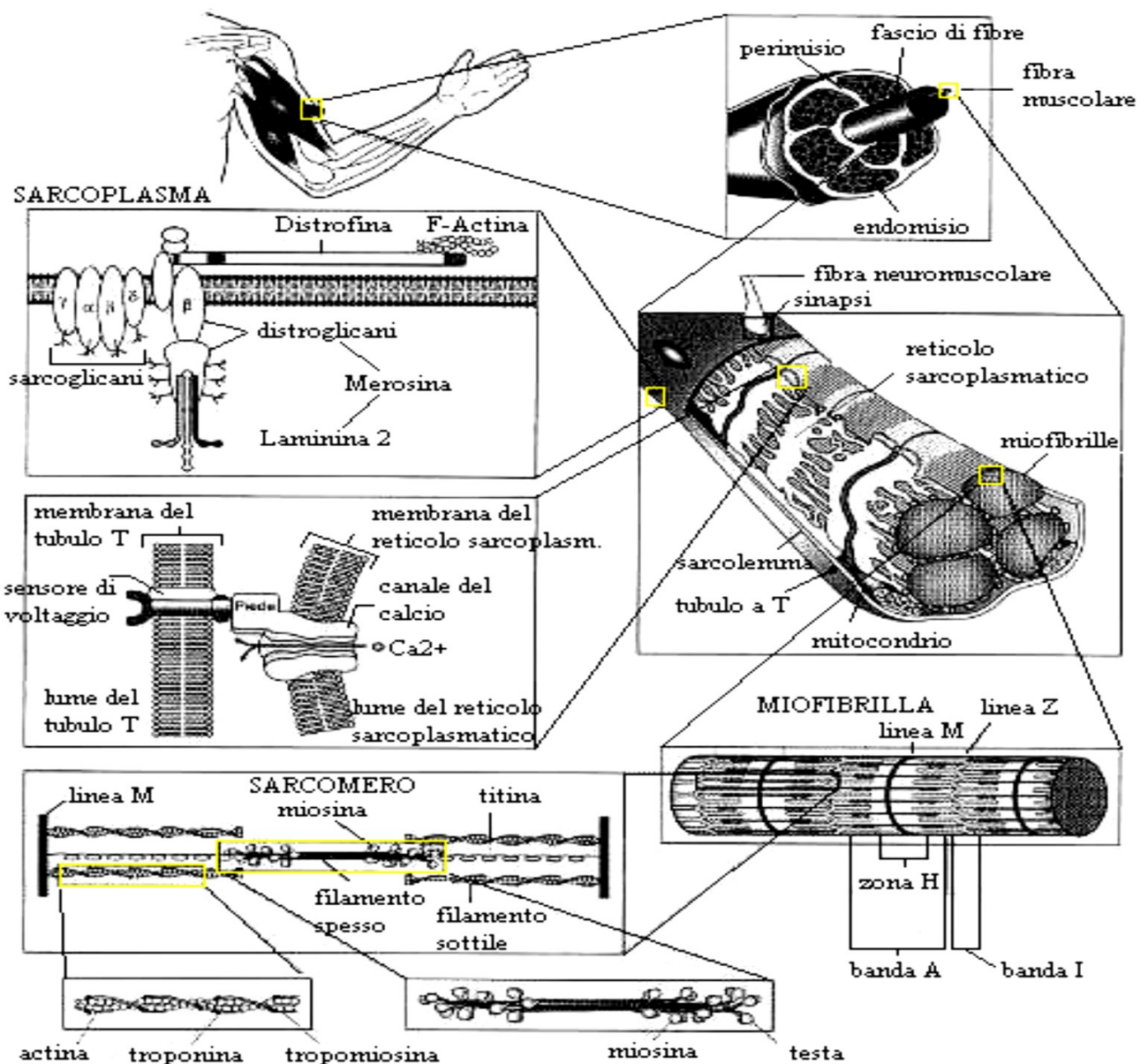


Figura 2. Organizzazione muscolo scheletrico

2.1.1.1 Tipi di fibre muscolari

Le fibre del muscolo scheletrico possono essere suddivise in tre tipi in base alle diverse capacità funzionali: fibre lente, fibre veloci e fibre con caratteristiche intermedie [31].

Le *fibre lente* o *fibre rosse* a causa dell'elevato contenuto di mioglobina, sono fibre caratterizzate da una piccola superficie trasversale, da numerosissimi mitocondri e da una fitta rete di capillari. Le

fibre lente sono caratterizzate da una modesta estensione del sarcolemma. Dal punto di vista biochimico, queste fibre utilizzano principalmente il metabolismo ossidativo. Le fibre lente hanno tempo di contrazione lungo, superiore a circa 60 ms, ma grazie all'elevato numero di mitocondri e alla bassa velocità di utilizzazione dell'ATP sono notevolmente resistenti alla fatica.

Le *fibre veloci di tipo II b* o *fibre bianche* sono fibre povere di mioglobina. Queste fibre, infatti, hanno un metabolismo di tipo glicolitico che utilizza la scissione anaerobica del glicogeno per produrre l'energia di cui necessitano. I rapidi tempi di contrazione e di rilasciamento che le caratterizzano sono da mettere in relazione con l'elevato contenuto di ATPasi e fosforilasi ed è noto che, durante la contrazione, accumulano un debito di ossigeno che viene estinto durante il successivo rilasciamento. Le fibre veloci, soprattutto se stimolate in modo ripetitivo, hanno un tempo di contrazione che oscilla tra 25 e 40 ms.

Le *fibre veloci di tipo II a* possiedono caratteristiche strutturali, ultrastrutturali e biochimiche intermedie rispetto agli altri due tipi di fibre; la loro velocità di contrazione è di poco superiore a quella delle fibre veloci suscettibili alla fatica, resistono all'affaticamento quasi come quelle lente e sviluppano forze pari al doppio di quelle sviluppate da queste ultime.

Generalmente, ogni muscolo contiene i tre tipi di fibre muscolari in proporzioni diverse: le fibre lente occupano la parte più interna del muscolo, dove è maggiormente estesa la rete vascolare, mentre le fibre veloci non resistenti alla fatica occupano regioni più superficiali, normalmente meno vascolarizzate. Va, inoltre, ricordato che esistono muscoli posturali che sono principalmente costituiti da fibre lente, mentre altri muscoli come gli oculomotori sono costituiti quasi esclusivamente da fibre veloci.

2.1.2 Tessuto muscolare striato cardiaco

Il tessuto muscolare striato cardiaco è costituito da singole fibrocellule, o *cardiomiociti*, che sono collegate le une con le altre per mezzo di particolari giunzioni intercellulari, detti *dischi intercalari*, dove sono presenti desmosomi e giunzioni comunicanti. Gli stimoli della contrazione passano da una cellula all'altra appunto tramite le giunzioni comunicanti. I cardiomiociti hanno un singolo nucleo situato centralmente e si presentano ramificati a "Y" alle estremità. Queste cellule possiedono i sarcomeri e mostrano le caratteristiche striature trasversali. L'organizzazione dei filamenti di actina e miosina del miocardio è analoga a quella del muscolo scheletrico e identiche sono le basi molecolari che ne regolano la contrazione. Hanno però mitocondri molto più numerosi. Nei cardiomiociti si osserva un reticolo sarcoplasmatico assai sviluppato. Questo si riferisce al *miocardio comune* che costituisce gran parte del tessuto muscolare del cuore. Esiste poi il *miocardio specifico*, che ha la funzione di condurre ad alta velocità gli impulsi di contrazione. Le cellule che compongono il miocardio specifico sono diverse e hanno caratteristiche diverse da quelle del miocardio comune come la scarsità delle fibrille contrattili e la mancanza di striatura. Il tessuto miocardico si contrae involontariamente senza l'intervento del sistema nervoso. Il suo ritmo viene invece controllato dal sistema nervoso autonomo. Particolarità del tessuto miocardico è la sua incapacità rigenerativa, per cui una lesione, produce una cicatrice connettivale che rende la parete del cuore meno resistente e meno efficiente.

2.1.3 Tessuto muscolare liscio

Il tessuto muscolare liscio è costituito da cellule allungate e affusolate, provviste di miofilamenti nel sarcoplasma che però non mostra striature e quindi neppure l'organizzazione in sarcomeri. Le cellule muscolari lisce, per contrarsi, sfruttano ugualmente le interazioni fra actina e miosina, che

non sono però organizzate permanentemente in miofibrille. I filamenti si orientano parallelamente all'asse maggiore delle cellule, ma in superficie tendono ad incrociarsi obliquamente per inserirsi sulla membrana plasmatica. In queste cellule mancano la troponina e la tropomiosina. Le cellule muscolari lisce hanno una forma allungata e fusata, con un nucleo posto al centro. Esse per lo più formano fasci o strati nella rete degli organi cavi, compresi i vasi sanguigni, nella pelle e nel bulbo oculare. Le cellule muscolari lisce hanno la proprietà di poter aumentare le dimensioni e anche di numero.

2.2 La contrazione del muscolo scheletrico

2.2.1 Le proteine contrattili del muscolo scheletrico

Le principali proteine contrattili sono l'actina, la miosina, la tropomiosina e la troponina. La più abbondante è la miosina che si presenta con una testa globulare e una coda filamentosa. Ogni miofilamento spesso è formato da un fascio di numerose molecole di miosina, le cui teste sporgono dal filamento stesso (Figura 3). Esse sono dotate di attività ATPasica.

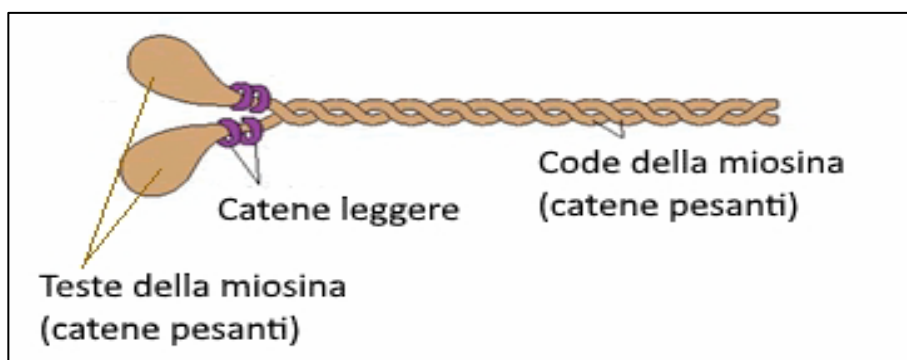


Figura 3. Filamento spesso

Le molecole di actina sono globulari (G-actina) e in ogni miofilamento sono legate tra loro a formare due lunghe file avvolte a elica (F-actina). La molecola di actina rivolge all'esterno un sito che interagisce con la testa della miosina (Figura 4). La tropomiosina è formata da due catene avvolte a

spirale che si inseriscono nella doccia costituita dalle due "collane" di G-actina. La troponina infine, è costituita da tre subunità globulari, è legata ad intervalli regolari alla tropomiosina, completando il filamento sottile.

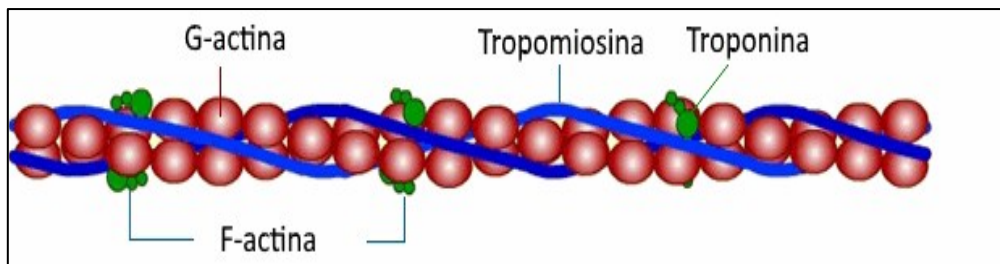


Figura 4. Filamento sottile

2.2.2 Fisiologia della contrazione muscolare

La contrazione muscolare ha inizio quando un impulso nervoso raggiunge una fibra muscolare. La trasmissione dell'impulso nervoso è assicurata dalla presenza, nel punto in cui la terminazione della fibra nervosa prende contatto con la fibra muscolare, di un dispositivo specializzato, la placca motrice. A questo livello si ha la liberazione di un neurotrasmettitore, l'acetilcolina. L'acetilcolina provoca l'apertura dei canali proteici Ca^{++} causando la depolarizzazione della fibra muscolare. Grazie ai tubuli a T, il segnale si propaga in profondità nella fibra. La depolarizzazione quindi stimola il rilascio di una grande quantità di ioni calcio presenti all'interno del reticolo sarcoplasmatico. Raggiunto il sarcoplasma, gli ioni calcio si legano ai siti specifici presenti sulla troponina C, che interagisce con le altre subunità troponiniche per spostare la tropomiosina dai siti di legame della G-actina. Nella fase di riposo del muscolo, le teste di miosina si trovano staccate dai siti di legame presenti sulle catene di actina e ad ogni testa è legata una molecola di ATP. Con la liberazione del calcio nel sarcoplasma avviene l'esposizione dei siti di legame per la miosina sull'actina. A questo livello avviene l'idrolisi dell'ATP sulle teste miosiniche, da cui risultano ADP e un gruppo fosfato P e

da cui la miosina ricava l'energia per il legame e il successivo spostamento. È possibile immaginare che durante la contrazione, i filamenti sottili "scivolano" lungo quelli spessi. A questo punto la testa della miosina cambia forma e si flette verso la linea M, trascinando il filamento di actina verso il centro del sarcomero. Il legame della testa di miosina con una nuova molecola di ATP causa il distacco della miosina dall'actina. A questo punto, in seguito ad una nuova idrolisi dell'ATP, la testa della miosina è pronta a legarsi nuovamente ad una G-actina in un sito più vicino alla linea Z del sarcomero. Così il ciclo può ricominciare. Siccome questo succede in tutti i sarcomeri successivi della fibra muscolare e allo stesso tempo in tutte le miofibrille della fibra, questa si accorcia generando così la contrazione. Quando la fibra muscolare è a riposo la contrazione muscolare è impedita dalla tropomiosina e pertanto, affinché riavvenga la contrazione, è necessario che la tropomiosina si sposti e liberi i siti sull'actina, processo che si verifica quando viene nuovamente liberato, al termine di una serie di eventi, il calcio dal reticolo sarcoplasmatico (Figura 5).

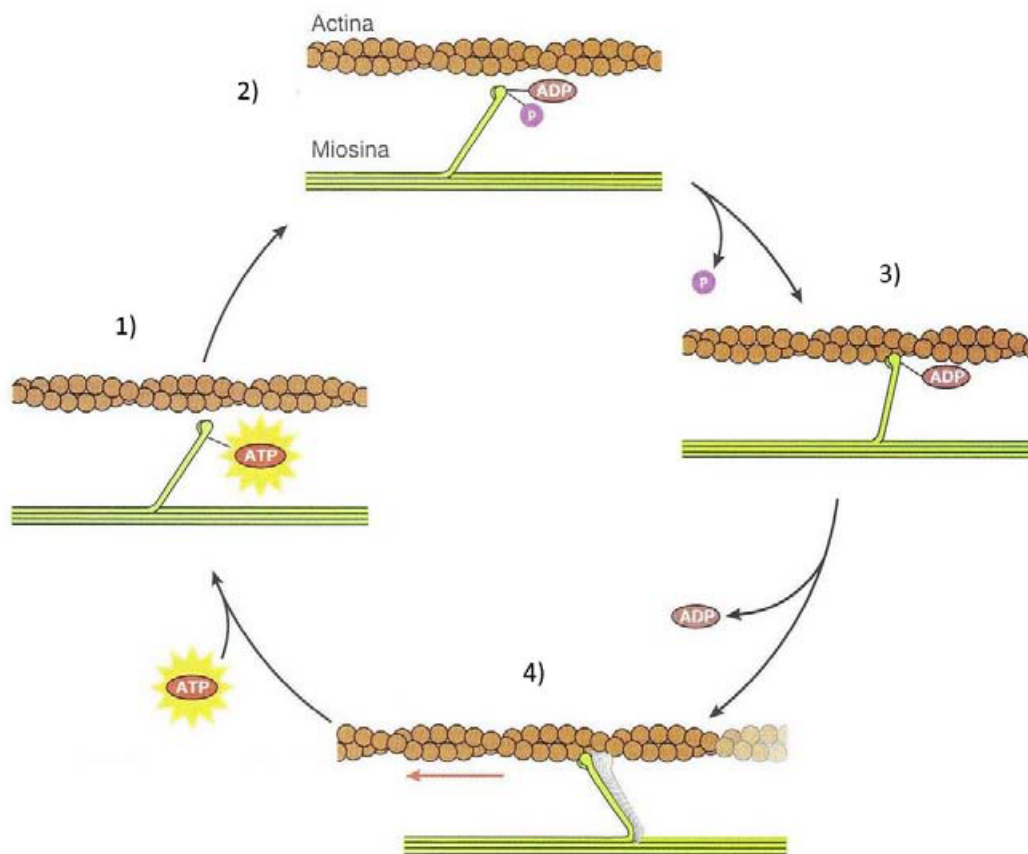


Figura 5. Processo ciclico della contrazione muscolare. La miosina, grazie all'energia fornita dall'idrolisi dell'ATP, forma il ponte trasversale e trascina il filamento di actina.

2.2.3 Tipologie di contrazione muscolare

Si distinguono tipologie di contrazione muscolare isotonica, isometrica ed auxotonica.

Nella *contrazione muscolare isotonica* gli elementi contrattili del muscolo si contraggono, ma quelli elastici non modificano la loro lunghezza. Si avrà, quindi un accorciamento del muscolo.

Nella *contrazione muscolare isometrica* gli elementi contrattili del muscolo si contraggono e quelli elastici vengono allungati. In questa tipologia di contrazione non si andrà ad osservare nessun accorciamento del muscolo.

La *contrazione muscolare auxotonica* rappresenta una combinazione tra la sollecitazione muscolare isotonica e la sollecitazione muscolare isometrica. Questa tipologia di contrazione è quella che si osserva più frequentemente nella pratica sportiva.

La contrazione muscolare prevede due fasi: la contrazione eccentrica e la contrazione concentrica.

Nella *contrazione concentrica* si ha un avvicinamento dei capi articolari e pertanto si va ad attuare nella stessa direzione della contrazione muscolare vera e propria. Mentre, nel caso in cui la resistenza esterna da vincere sia superiore alla capacità di erogare forza, verrà generata una tensione muscolare dove il movimento avviene nella direzione opposta alla *contrazione eccentrica* (o cadente).

2.2.4 Co-contrazione muscolare

In base al lavoro che viene compiuto, i muscoli possono essere distinti in *agonisti* e *antagonisti*. Tale distinzione è puramente relativa, poiché un muscolo è, di norma, sia agonista sia antagonista, secondo i movimenti che vengono compiuti nell'ambito dell'articolazione: un muscolo può essere agonista in un movimento e antagonista in quello opposto. La funzione dei muscoli antagonisti è quella di regolare e contenere i movimenti dovuti alla contrazione dei muscoli agonisti, che, altrimenti risulterebbero incontrollati ed eccessivi. Un muscolo, pertanto, può presentare azioni opposte e tutto ciò dipende dal gesto motorio che deve essere compiuto [31].

La *co-attivazione muscolare* si verifica quando si ha il reclutamento concomitante di muscoli agonisti e antagonisti che circondano una giunzione per fornire una maggiore stabilità articolare. È anche nota come co-contrazione muscolare poiché due gruppi muscolari si contraggono simultaneamente e quindi creano una compressione sulla giunzione. In realtà, il meccanismo generale è ancora

ampiamente sconosciuto. Si ritiene che sia importante nella stabilizzazione delle articolazioni anche in soggetti patologici. La co-attivazione muscolare viene misurata tramite elettromiografia di superficie (sEMG) [32]. Quando il muscolo è contratto, l'sEMG è in grado di visualizzare la forza della contrazione o come i nervi possono rispondere alla stimolazione.

2.3 Fisiologia-anatomia del ginocchio

Nel presente studio andremo a valutare le co-contrazioni dei muscoli afferenti all'articolazione del ginocchio in particolare il gastrocnemio (GL) e il vasto laterale (VL). Di seguito, verrà quindi descritta in maniera sintetica la fisiologia di questa articolazione.

2.3.1 Articolazione del ginocchio

L'articolazione del ginocchio (un ginglymo angolare) è costituita dai due condili femorali, laterale e mediale, e dalle superfici articolari dei condili tibiali [31]. I primi presentano una curvatura più accentuata rispetto ai condili tibiali; pertanto i punti di contatto nell'articolazione del ginocchio sono molto limitati. Per questo motivo l'articolazione è provvista di due menischi che eliminano queste incongruenze di superficie. I menischi, laterale e mediale, sono costituiti da cartilagine fibrosa che ammortizza la pressione che subisce l'articolazione e hanno forma a "C" (Figura 6). Essi si comportano come cunei che modificano la cavità glenoidea in rapporto ai movimenti del ginocchio. Oltre ai menischi, l'articolazione del ginocchio è dotata di numerosi legamenti che provvedono alla

stabilità e alla limitazione dei movimenti. I principali sono i legamenti crociati anteriore e posteriore che impediscono lo scivolamento in avanti e indietro del femore e della tibia.

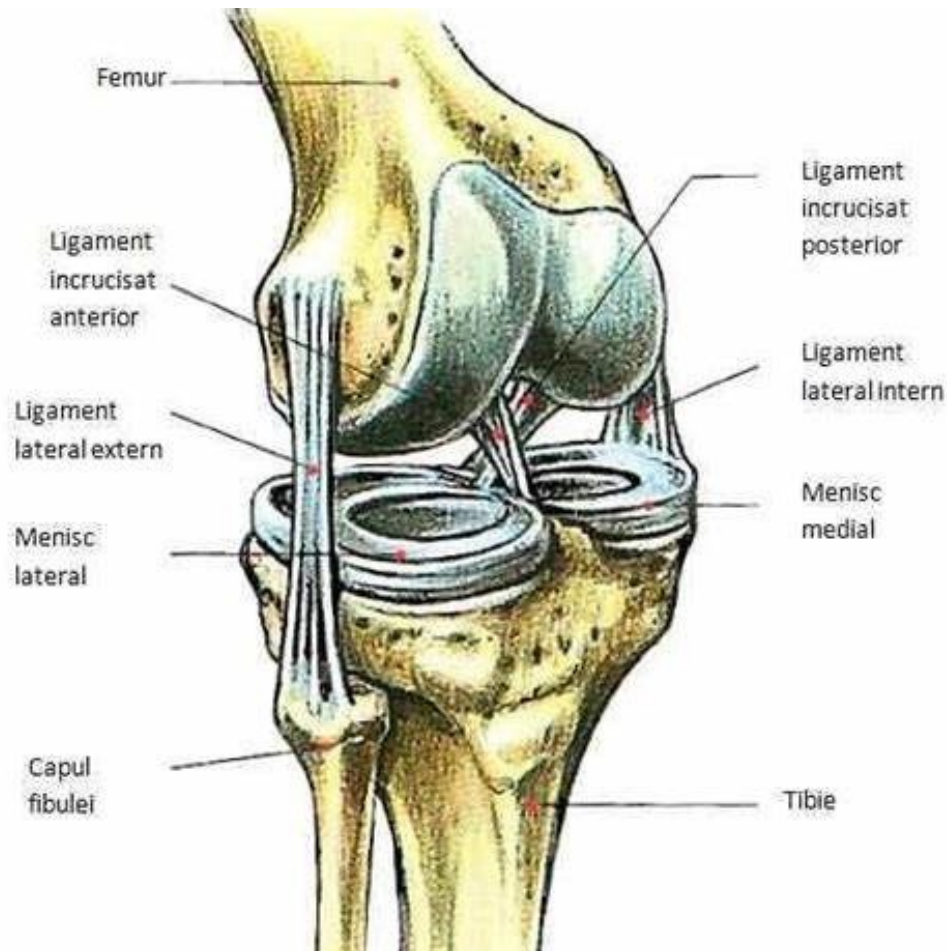


Figura 6. Anatomia del ginocchio

2.3.2 Gruppi muscolari

Dal punto di vista muscolare, il ginocchio rappresenta la regione di unione fra la coscia e la gamba. Pertanto, è possibile descrivere una regione anteriore (Figura 7) e una posteriore (Figura 8), o poplitea, separate da due linee verticali immaginarie passanti per i condili laterale e mediale del femore. I gruppi muscolari presenti sono:

a) Muscolo tensore della fascia lata

È un muscolo lungo e stretto che si trova nella porzione esterna della coscia. L'azione del muscolo è l'abduzione della coscia, aiuta anche nel movimento di estensione della gamba sulla coscia.

b) Muscolo sartorio

È il muscolo più lungo che abbiamo, stretto e nastriforme ha un andamento ad "S" e decorre sopra al quadricipite. Il sartorio è un muscolo che permette di accavallare le gambe come un sarto; infatti flette, extra-ruota e abduce la coscia oltre a flettere e ruotare internamente la gamba.

c) Muscolo quadricipite femorale

È il più importante estensore del ginocchio ed è un muscolo fondamentale per la deambulazione. Si trova sulla loggia anteriore della coscia, è un muscolo formato da quattro capi: vasto laterale, vasto intermedio, vasto mediale, retto femorale.

In particolare, il muscolo *vasto laterale* si trova fra il muscolo retto femorale e il tratto ileo-tibiale, sotto il muscolo tensore della fascia lata ed è innervato grazie al nervo femorale. Origina dalla linea aspra laterale del femore e ha inserzione nella tuberosità tibiale anteriore. Grazie alla sua azione, riesce ad estendere la gamba.

d) Ischio-Crurali

Sono tre muscoli della loggia posteriore della coscia: il bicipite femorale, il semimembranoso e il semitendinoso. Essi hanno un ruolo importantissimo nella cinematica del ginocchio perché la loro azione proteggono il legamento crociato anteriore dalle lesioni.

e) Gracile

È un muscolo piccolo e stretto e si trova sulla zona mediale della coscia. Il gracile adduce la coscia, flette e ruota internamente la gamba sulla coscia.

f) Muscolo popliteo

È un muscolo profondo che si trova nella parte posteriore della gamba, è largo e sottile. Esso flette e ruota medialmente la gamba.

g) Gastrocnemio

È noto anche col nome di *gemelli* ed è formato da due capi, uno mediale e l'altro laterale, che prendono origine dalla parte superiore del corrispondente condilo femorale e dalla parte adiacente della capsula articolare del ginocchio ai quali sono collegati attraverso un robusto tendine che si espande a ventaglio per dare origine alle fibre dei corrispettivi ventri muscolari. Il tendine del capo laterale talvolta contiene al suo interno la fabella (un osso sesamoide) ed origina dal condilo laterale e dalla superficie posteriore del femore. Il tendine del capo mediale invece origina da una faccetta posta sulla parete posteriore del condilo mediale al di sotto del tubercolo del muscolo adduttore della gamba e da una zona rugosa della cavità poplitea. Entrambi i tendini sono separati dal ginocchio grazie ad una borsa mucosa: la borsa del capo mediale è in comunicazione con la cavità articolare del ginocchio e con una borsa posta tra il capo mediale stesso ed il muscolo semimembranoso. I due capi formano i corrispondenti margini inferiori della fossa poplitea e ciascuno termina su un'aponeurosi che corrisponde alla faccia anteriore del muscolo, il mediale più in basso del laterale. Le due aponeurosi successivamente si uniscono tra loro nel tendine di Achille. Il suddetto muscolo, assieme al muscolo soleo è il principale responsabile della flessione plantare del piede, ma partecipa anche alla flessione del ginocchio.

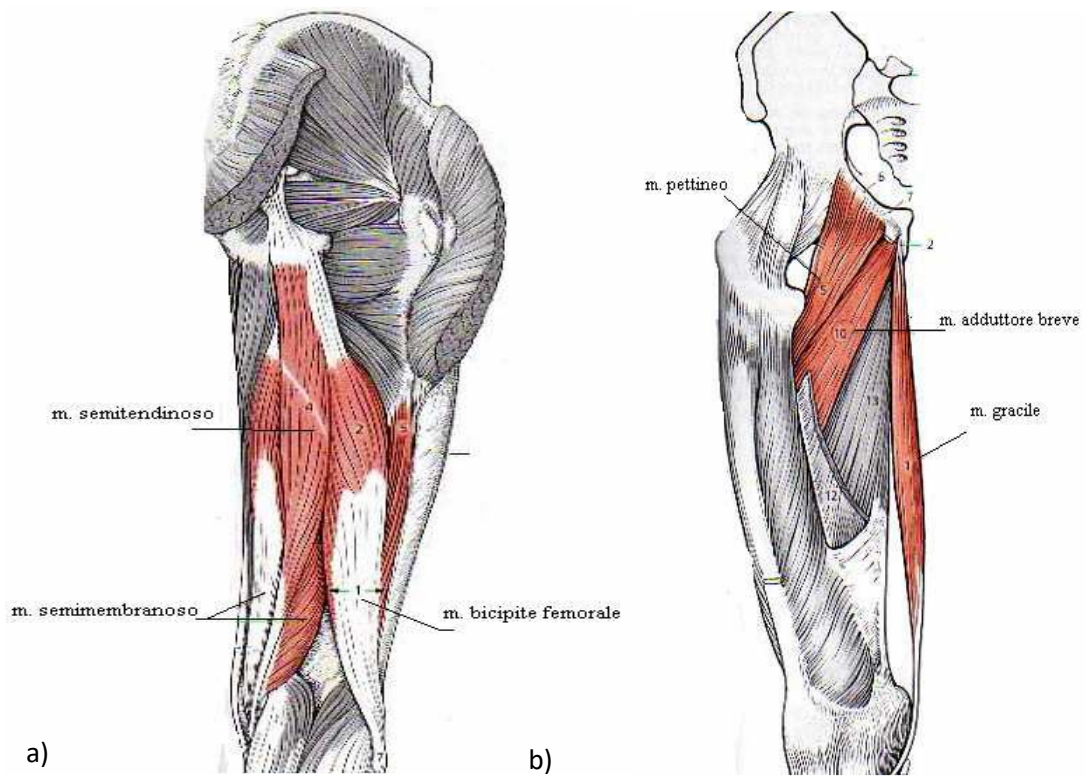


Figura 7. Regione anteriore, a) gruppo posteriore, b) adduttori

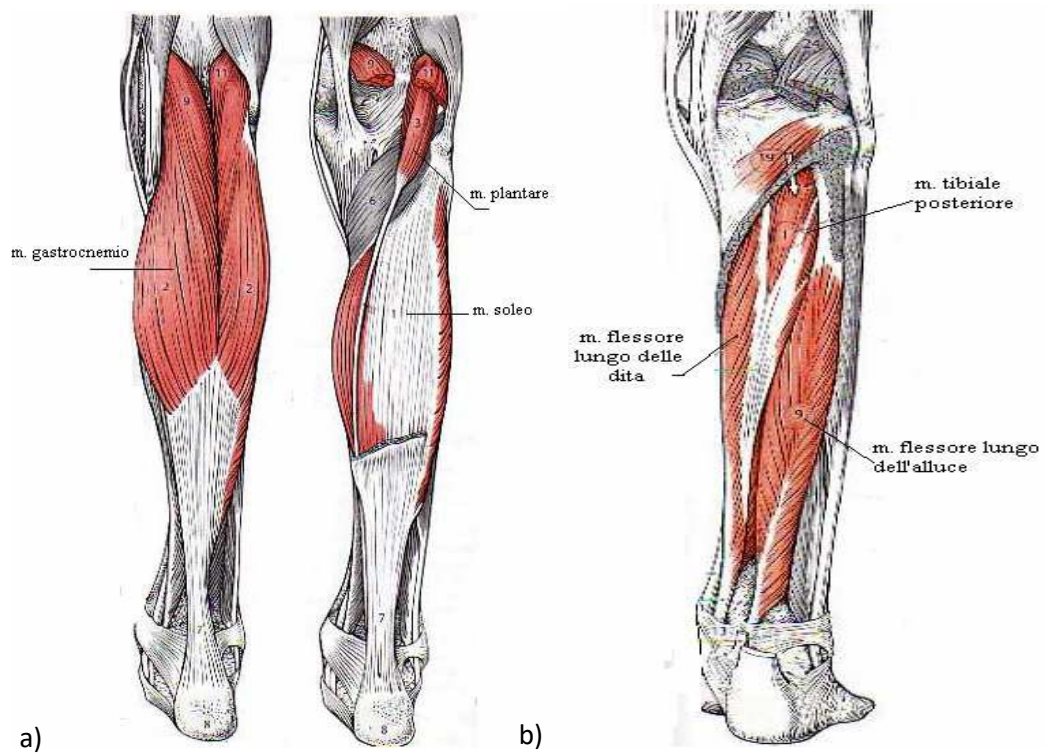


Figura 8. Regione posteriore, a) strato superficiale, b) strato profondo

2.3.3 Movimenti dell'articolazione

L'articolazione del ginocchio è regolata principalmente dai tendini e dai gruppi muscolari del quadricipite. I tendini hanno una funzione di scarico e limitano la traslazione della tibia anteriore aumentando la flessione del ginocchio. Il quadricipite invece, controlla l'estensione dell'articolazione. Durante il cammino, il ginocchio è caratterizzato da una larga gamma di movimenti nel piano sagittale e di piccoli archi nel piano trasversale. I movimenti sul piano sagittale favoriscono la progressione e l'avanzamento degli arti in oscillazione. I movimenti sul piano trasversale facilitano l'equilibrio verticale [31]. Le co-attivazioni tra i muscoli del quadricipite sono particolarmente importanti in termini di stabilità.

3. Gait Analysis

3.1 Gait cycle

Durante la camminata, che ha come scopo quello di permettere lo spostamento del soggetto, le principali funzioni svolte dall'apparato locomotore sono:

- Generazione di una forza propulsiva;
- Mantenimento della stabilità a livello superiore, nonostante il continuo cambiamento della situazione posturale;
- Assorbimento dello shock dovuto all'impatto con il terreno ad ogni passo;
- Conservazione dell'energia durante le funzioni precedenti, al fine di minimizzare lo sforzo da parte dei muscoli.

Quando avviene l'avanzamento del corpo, un arto funge da sostegno mentre l'altro avanza fino al successivo appoggio; in seguito i due arti si scambiano di ruolo ed entrambi i piedi sono in contatto con il terreno durante il trasferimento del peso del corpo da un arto all'altro. Una singola sequenza di queste funzioni è definita ciclo del passo (gait cycle, GC). Esso è definito come il periodo che intercorre tra due appoggi successivi dello stesso piede sul terreno. E' necessario distinguere due concetti:

- a) il *passo*, definito come l'equivalente del ciclo del passo, rappresenta l'unità funzionale di riferimento nella analisi del cammino. Esso è definito dall'intervallo di tempo tra due contatti iniziali successivi dello stesso piede (stride) e rappresenta il riferimento temporale in cui vengono descritti tutti gli altri eventi biomeccanici e di attività muscolare;

b) il *semipasso* inteso, invece, come la distanza tra l'appoggio di un piede (generalmente il tallone) e l'appoggio della stessa parte del piede controlaterale.

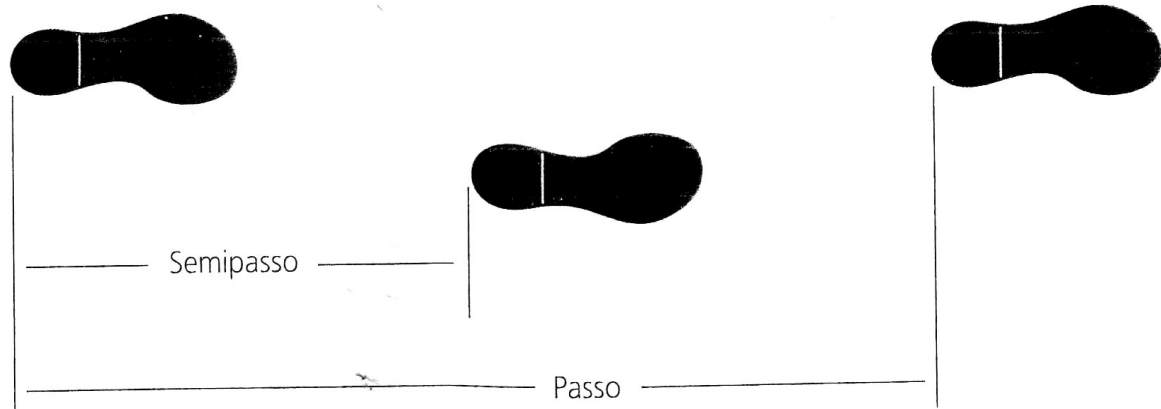


Figura 9. Distinzione tra passo e semipasso

Nell'ambito del ciclo del passo vengono definiti alcuni parametri spazio temporali di riferimento: la lunghezza dello stride data dalla lunghezza del piede più la distanza coperta in fase di oscillazione, la lunghezza del passo che è la distanza sul piano frontale del tallone dalla linea mediana di avanzamento, la cadenza che è il numero di step nell'unità di tempo, ed infine la velocità.

3.2 Fasi del passo

Data la sua complessità, ogni GC può essere diviso in due periodi [31] (Figura 10):

- *Fase di appoggio o stance*

Il piede è a contatto con il suolo e dura circa il 60% del ciclo. In questa prima fase il comportamento del piede può essere assimilato ad una molla. È proprio in questa fase che si deve attutire l'urto ed immagazzinare l'energia per la fase successiva.

- *Fase di oscillazione o swing*

Il piede è sollevato da terra per far avanzare l'arto e dura circa il 40% del ciclo. In questa seconda fase, invece, l'energia immagazzinata viene utilizzata per svolgere effettivamente il passo.

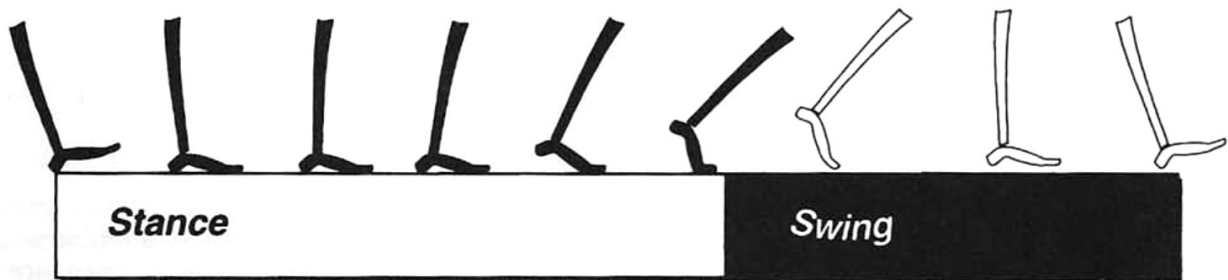


Figura 10. Fasi del passo

In realtà ognuna di queste fasi è a sua volta suddivisa in altre sottofasi la cui combinazione assolve compiti basilari come attenuare l'impatto del tallone sul terreno, assicurare la stabilità degli arti, consentire la progressione coordinata a ritmo regolare dei passi.

La fase di appoggio (Figura 11) si suddivide a sua volta in:

- *Contatto tallone (initial contact)*: è una fase molto breve in cui il tallone del piede avanti si trova a contatto con il suolo;
- *Risposta al carico (loading response)*: è il periodo iniziale del doppio appoggio dei piedi con il terreno;

- *Appoggio intermedio (mid-stance)*: corrisponde alla prima metà dell'intervallo di appoggio singolo. È la fase più lunga che inizia con lo stacco del piede e termina con il raggiungimento della stabilità dell'arto e del tronco in cui il piede è completamente appoggiato al suolo;
- *Appoggio terminale (terminal stance)*: questa fase conclude l'appoggio singolo in cui il peso del corpo è trasferito sull'avampiede;
- *Preoscillazione (preswing)*: questa fase finale dell'appoggio, rappresenta il secondo periodo di doppio appoggio del ciclo del passo dove il trasferimento del peso corporeo scarica rapidamente l'arto che non fornisce alcun contributo attivo, ma al contrario, si prepara alla richiesta di oscillazione.



Figura 51. Suddivisione fase di appoggio

La fase di oscillazione (Figura 12), invece, si può suddividere in:

- *Oscillazione iniziale (initial swing)*: inizia con il piede che si alza dal suolo e termina con l'arto che avanza fino ad una posizione parallela al piede di appoggio;

- *Oscillazione intermedia (mid-swing)*: inizia quando l'arto oscillante è opposto all'arto in appoggio e termina quando il primo avanza e la tibia corrispondente risulta verticale;
- *Oscillazione terminale (terminal swing)*: che completa l'avanzamento dell'arto e termina con il piede che entra in contatto con il suolo.



Figura 16. Suddivisione fase di oscillazione

3.2.1 Funzioni dell'intero arto inferiore durante il passo

Ciascuna delle otto fasi del passo, appena citate, ha un preciso obiettivo funzionale ed è caratterizzata da uno schema di movimento sinergico per raggiungere tale obiettivo. La combinazione sequenziale delle fasi è inoltre in grado di far effettuare all'arto tre compiti di base: l'accettazione del carico, l'appoggio singolo e l'avanzamento dell'arto [31].

Accettazione del carico

L'accettazione del carico caratterizza l'inizio del periodo d'appoggio e utilizza le prime due fasi del passo:

FASE 1: CONTATTO TALLONE

Intervallo: 0-2% ciclo del passo.

Evento: posizionamento dell'arto in modo da iniziare l'appoggio con il rotolamento del calcagno (Figura 13.1). Il contatto con il terreno, realizzato dal tallone, genera una brusca e momentanea forza di reazione verticale, dal momento che si verifica una caduta libera del corpo di circa 1cm. L'allineamento della linea di forza con le articolazioni introduce instabilità a tibiotarsica e anca mentre il ginocchio è stabile.

Obiettivo: preparazione per l'appoggio del tallone.

FASE 2: RISPOSTA AL CARICO

Intervallo: 0-10% ciclo del passo.

Eventi: rotolamento del calcagno e trasferimento del peso del corpo sull'arto in appoggio che avvicina l'avampiede al suolo con conseguente flessione plantare della tibiotarsica e flessione del ginocchio (Figura 13.2). La flessione plantare della tibiotarsica, dovuta al vettore applicato al calcagno, contribuisce all'assorbimento dell'impatto, la flessione del ginocchio, introdotta dall'azione dei muscoli pretibiali è sufficiente per contribuire all'assorbimento mantenendo la stabilità necessaria per la sicurezza del carico.

Obiettivi: assorbimento dell'impatto, stabilità sotto carico, conservazione della progressione.

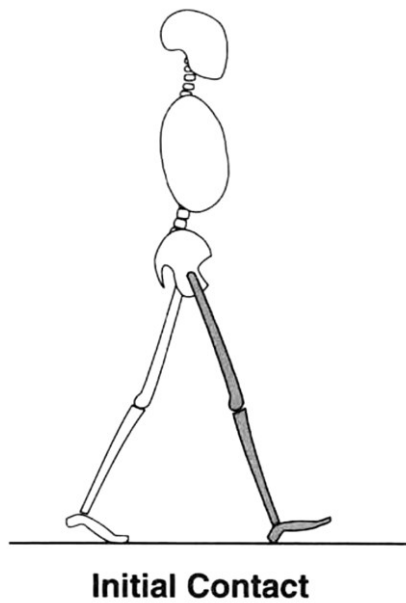


Figura 13.1 Contatto tallone

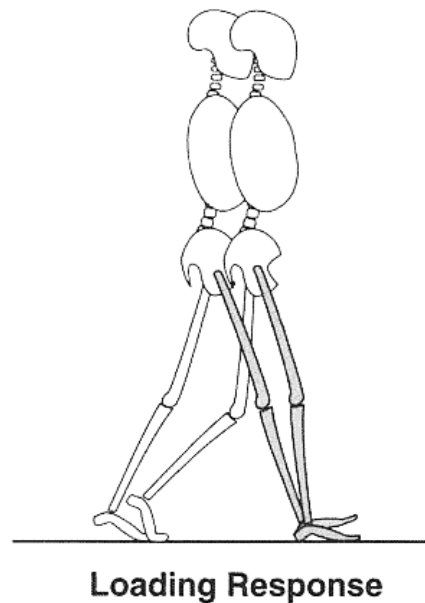


Figura 13.2 Risposta al carico

Appoggio singolo

Il distacco del piede contro laterale per l'oscillazione determina l'inizio dell'appoggio singolo per l'arto a contatto con il suolo. Questo continua fino a quando il piede contro laterale non entra nuovamente a contatto con il terreno. Comprende le fasi:

FASE 3: APPOGGIO INTERMEDIO

Intervallo: 10-30% del ciclo del passo.

Eventi: momento in cui il vettore modifica il proprio allineamento a livello di ogni articolazione (Figura 14.1). Man mano che l'arto ruota in avanti sul piede d'appoggio il punto critico per la stabilità dinamica si sposta dal ginocchio alla tibiotarsica con il vettore che diventa anteriore alla tibiotarsica e al ginocchio e posteriore rispetto all'anca.

Obiettivi: progressione sul piede di appoggio, stabilità dell'arto e del tronco. Il momento creato dalla progressione, che deriva dall'oscillazione dell'arto contro laterale e dal rotolamento del calcagno, porta la tibiotarsica in flessione dorsale e nella fase finale, all'estensione del ginocchio.

FASE 4: APPOGGIO TERMINALE

Intervallo: 30-50% del ciclo del passo.

Eventi: quando il corpo ruota anteriormente sull'avampiede, la tibiotarsica flette dorsalmente e il calcagno si solleva poiché il ginocchio ha completato l'estensione. L'avanzamento del tronco sposta il vettore in avanti più a livello della tibiotarsica (Figura 14.2). Alla fine dell'appoggio terminale la rotazione del complesso tibiotarsica/piede sulle dita porta il ginocchio in avanti fino e oltre il vettore, sbloccandolo e dando inizio alla sua flessione.

Obiettivi: progressione del corpo oltre il piede in appoggio.

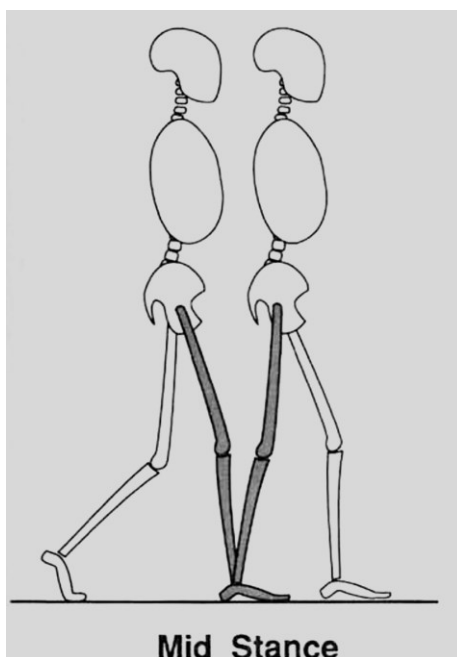


Figura 14.1 Appoggio intermedio

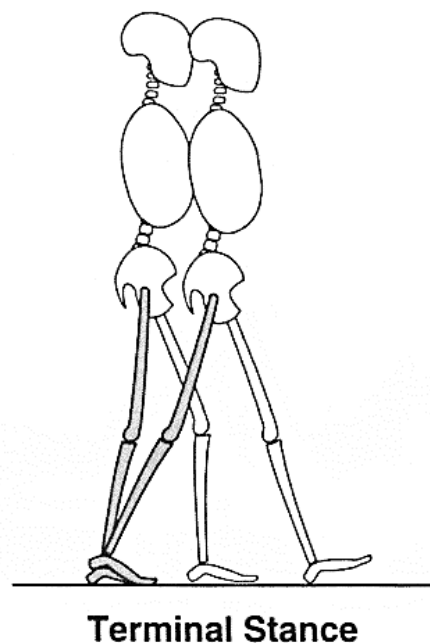


Figura 14.2 Appoggio terminale

Avanzamento dell'arto

Inizia nella fase finale dell'appoggio (preoscillazione) necessaria per il corretto posizionamento dell'arto che successivamente oscilla attraverso tre differenti movimenti di sollevamento, avanzamento e preparazione per il successivo appoggio.

FASE 5: PREOSCILLAZIONE

Intervallo: 50-60% del ciclo del passo

Eventi: L'ampio arco di flessione del ginocchio inizia in questa fase di doppio appoggio, quando la tibiotarsica si flette plantarmente (Figura 15.2). L'avanzamento del vettore oltre le articolazioni metatarsofalangee e il trasferimento del carico da un arto all'altro liberano il piede permettendogli di ruotare determinando il sollevamento del calcagno. Questo sposta il ginocchio davanti al vettore e ne determina la flessione e l'avanzamento della coscia.

Obiettivo: posizionamento dell'arto per l'oscillazione.

FASE 6: OSCILLAZIONE INIZIALE

Intervallo: 60-73% del ciclo del passo.

Eventi: il distacco delle dita segnala l'avanzamento dell'arto sollevato dal carico. La flessione del ginocchio aumenta per staccare il piede dal terreno. La flessione plantare della tibiotarsica è parzialmente ridotta mentre la flessione dell'anca fa ruotare la coscia in avanti.

Obiettivi: sollevamento del piede dal suolo, avanzamento dell'arto.

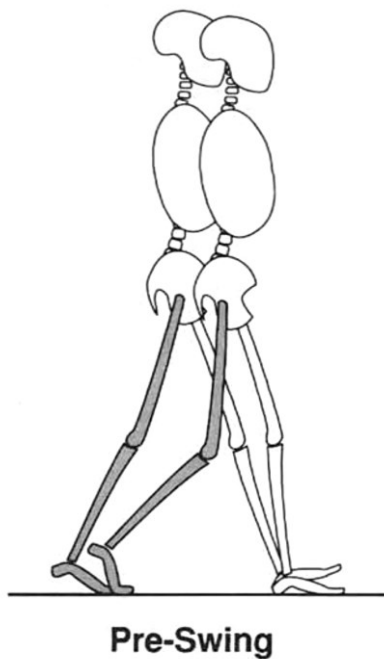


Figura 15.1 Preoscillazione

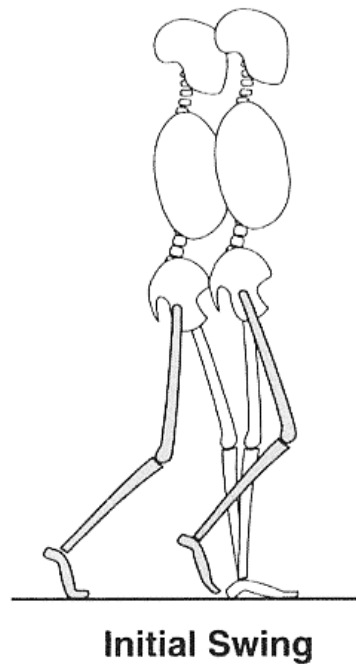


Figura 15.2 Oscillazione iniziale

FASE 7: OSCILLAZIONE INTERMEDIA

Intervallo: 73-87% del ciclo del passo.

Eventi: il distacco dal terreno dipende ora dalla posizione della tibiotarsica e dell'anca (Figura 16.1).

La tibiotarsica flette dorsalmente fino alla posizione neutra, l'anca continua la sua flessione mentre il ginocchio comincia a estendersi.

Obiettivi: avanzamento dell'arto, sollevamento del piede dal suolo.

FASE 8: OSCILLAZIONE TERMINALE

Intervallo: 87-100% del ciclo del passo.

Eventi: viene inibita l'ulteriore flessione dell'anca mentre il ginocchio continua a estendere fino alla sua posizione neutra (Figura 16.2). La tibiotarsica rimane in posizione neutra.

Obiettivi: completo avanzamento dell'arto e preparazione per l'appoggio.

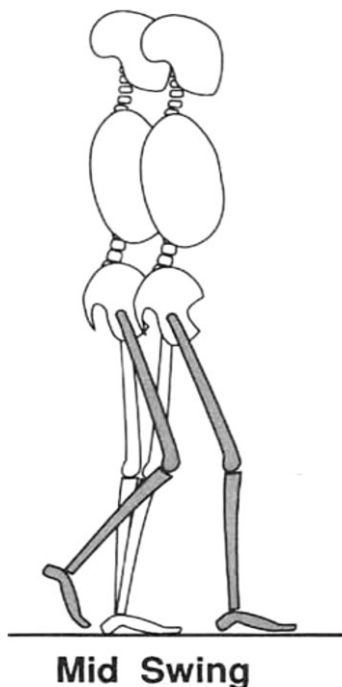


Figura 16.1 Oscillazione intermedia

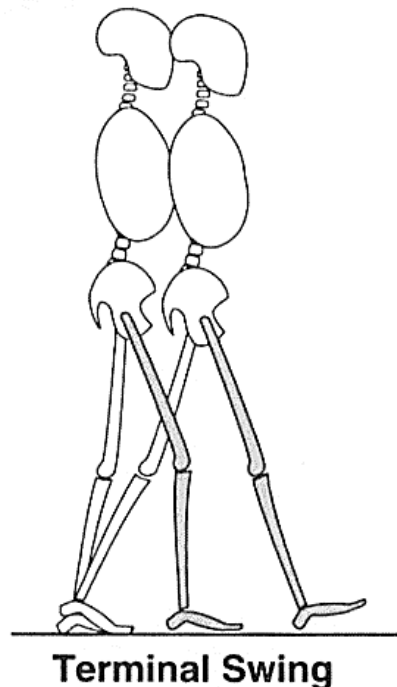


Figura 16.2 Oscillazione terminale

3.3 Attivazione muscolare durante il cammino

3.3.1 Controllo muscolare nella fase di appoggio

Durante la fase di appoggio, i muscoli di controllo sono dedicati a fornire la stabilità in carico, l'assorbimento dell'impatto e la progressione sul piede di appoggio. I muscoli responsabili sono gli estensori dell'arto che agiscono fondamentalmente per contrastare i momenti generati dalla gravità [31]. Tali muscoli seguono una sequenza d'azione che inizia nell'oscillazione terminale e continua per tutto l'appoggio terminale (Figura 17).

Oscillazione terminale

Nella parte iniziale dell'oscillazione terminale i tre ischio-crurali proseguono l'attivazione dell'oscillazione intermedia con un picco di intensità per assorbire parzialmente l'impatto con il terreno, frenando prima la coscia e poi la gamba mentre nella parte finale riducono la loro intensità per evitare la flessione del ginocchio. La flessione viene comunque contrastata dall'attivazione dei quattro vasti per assicurare la completa estensione del ginocchio necessaria per il contatto iniziale. La decelerazione del femore continua grazie all'azione dei due estensori mono-articolari dell'anca e la riattivazione dei muscoli pretibiali posiziona il piede per la successiva azione di rotolamento del calcagno.

Risposta al carico

L'azione dei muscoli pretibiali raggiunge il picco di intensità nella parte iniziale della risposta al carico, per frenare la velocità di flessione plantare passiva della tibiotarsica; questo comporta il rotolamento del calcagno e la flessione del ginocchio per l'assorbimento dell'impatto. L'azione dei quattro vasti aumenta rapidamente fino a raggiungere il picco di intensità; la loro funzione consiste nel limitare la flessione del ginocchio, avviata con il rotolamento del calcagno, e nell'assicurare una stabile accettazione del carico. Dopo che è stata controllata questa azione di flessione del ginocchio, i muscoli vasti si rilasciano rapidamente.

Appoggio intermedio / Appoggio terminale

Il muscolo vasto presenta un breve periodo di attività durante la parte iniziale dell'appoggio intermedio, per assistere l'estensione del ginocchio, ma di fatto la graduale progressione sul piede in appoggio viene assicurata dai flessori plantari della tibiotarsica. Il primo muscolo a essere attivato è il soleo. L'azione del soleo fornisce una forza di flessione plantare che frena la velocità di avanzamento della tibia. Il picco di attività del soleo si verifica in prossimità della fine dell'appoggio terminale, in risposta a due richieste: il vettore del corpo avanza fino all'avampiede creando un

elevato momento dorsi-flessorio che deve essere contrastato per mantenere la stabilità in carico; in secondo luogo, il distacco del tallone richiede un forte momento plantarflessorio per sostenere il peso del corpo. L'azione del muscolo soleo cessa rapidamente non appena l'arto contro laterale tocca il terreno. L'attivazione del gastrocnemio segue rapidamente quella del soleo ed il suo incremento in intensità è analogo; il ritardo è correlato all'azione flessoria del ginocchio da parte di tale muscolo.

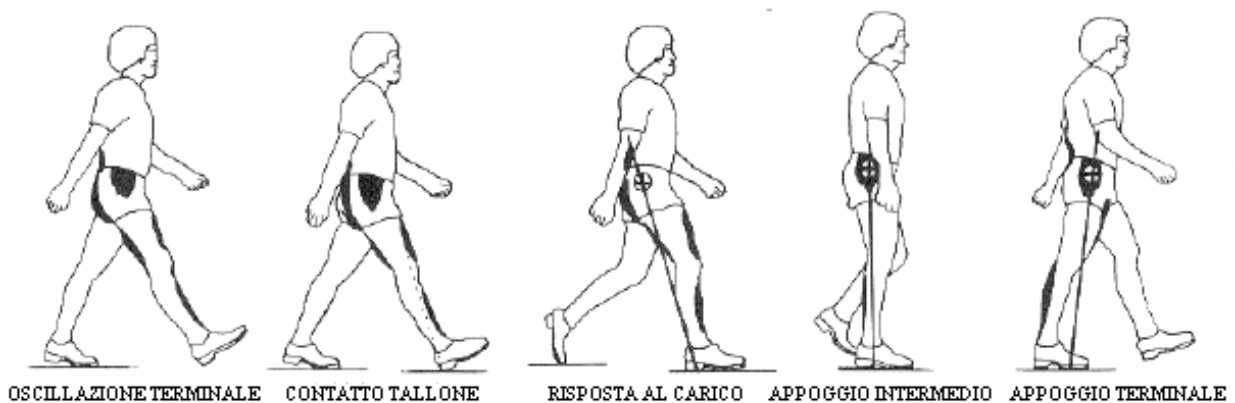


Figura 17. Attivazione muscolare nella fase di appoggio

3.3.2 Controllo muscolare nella fase di oscillazione

La transizione dall'appoggio all'oscillazione è compiuta nella preoscillazione, a cui segue, nell'oscillazione iniziale, un'azione sinergica dei muscoli flessori che sollevano e fanno avanzare l'arto. Nell'oscillazione intermedia continua l'attività muscolare presente in quella iniziale, con una minima azione muscolare aggiuntiva (Figura 18).

Preoscillazione

Nella preoscillazione il muscolo adduttore lungo si attiva per contrastare il momento abduzionale dell'anca, creato dallo spostamento del carico sull'altro arto. Successivamente nella fase finale della preoscillazione avviene l'attivazione del retto femorale, infatti il suo ruolo consiste nella decelerazione dell'eccessiva flessione del ginocchio, quando gli eventi passivi potrebbero prendere il sopravvento ma anche nella flessione dell'anca per favorire l'avanzamento dell'arto. Con l'inizio del doppio appoggio, il vettore di forza avanza oltre le articolazioni metatarsofalangee, liberando il piede. Ciò permette all'energia potenziale dell'arto di trasformarsi in energia cinetica e favorire il movimento della tibia, generando la flessione del ginocchio e ruotando ulteriormente la coscia in avanti. In questa fase si fa sentire la tensione residua del tricipite che aumenta la flessione del ginocchio, aumentando l'avanzamento della tibia e del piede verso il punto di contatto. Questa moderata forza di flessione plantare viene contrastata dall'azione dorsiflessoria dei muscoli pretibiali che aumenta rapidamente di intensità sollevando il piede dalla sua precedente posizione in flessione plantare.

Oscillazione iniziale

In questa fase si ha l'attivazione simultanea del gracile, del sartorio e dell'iliaco che determinano la rotazione anteriore della coscia, a cui si aggiunge l'azione del capo breve del bicipite femorale per aumentare la componente flessoria del ginocchio.

Oscillazione intermedia

Nell'ultima fase i tracciati elettromiografici mostrano una significativa riduzione dell'attività dei flessori dorsali della tibiotarsica; l'unico muscolo dell'anca a essere ancora attivo è il gracile. Spesso

i muscoli sono silenti nell'oscillazione intermedia e questo perché il momento generato dalla vigorosa azione muscolare nell'oscillazione iniziale è sufficiente per concludere la sospensione dell'arto.

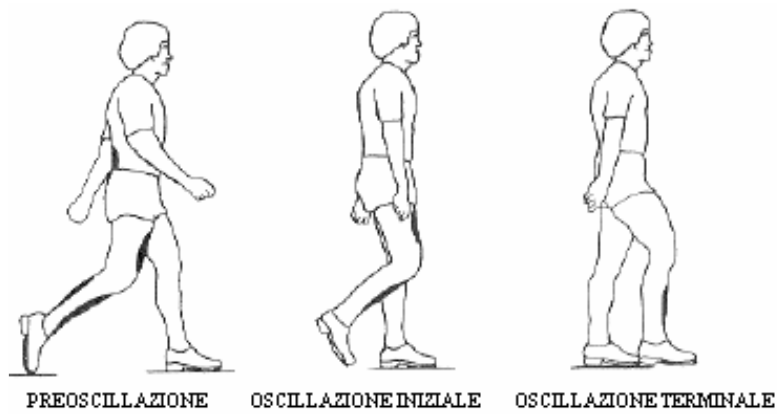


Figura 18. Attivazione muscolare nella fase di oscillazione

4. Materiali e metodi

4.1 Soggetti

I segnali elettromiografici su cui è stato svolto questo lavoro di tesi sono stati acquisiti presso il Laboratorio di Analisi del movimento del Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università Politecnica delle Marche. 48 soggetti con valori medi di età, altezza e peso rispettivamente pari a 23.9 ± 1.9 anni, 173 ± 10 cm e 63.3 ± 12.4 kg, di cui 24 di sesso femminile e 22 di sesso maschile sono stati reclutati a tal fine. Sono state escluse patologie del ginocchio, disordini neurologici e altre patologie che potrebbero influenzare la meccanica del cammino. I muscoli considerati nell'analisi sono il gastrocnemio laterale (GL) e il vasto laterale (VL).

4.2 Acquisizione del segnale

I partecipanti sono stati dotati di strumentazione bilaterale con sonde elettromiografiche di superficie (sEMG), un elettrogoniometro e tre interruttori basografici. I segnali sEMG sono stati acquisiti attraverso il sistema Step32 (Medical Technology, Italia), con una frequenza di campionamento di 2kHz e una risoluzione di 12 bit. Le sonde utilizzate presentavano le seguenti caratteristiche: geometria fissa con elettrodo di Ag/Ag-Cl; di diametro 0.4 cm; distanza tra elettrodi 0.8 cm; guadagno 1000; impedenza d'ingresso > 1.5 G Ω ; CMRR > 126 dB). Le sonde sono state posizionate sul gastrocnemio (GAS) e sul vasto (VST), seguendo il protocollo SENIAM suggerisce delle indicazioni sul posizionamento e orientamento sul muscolo degli elettrodi [32]. I segnali sono

stati filtrati dal sistema con un filtro FIR a fase lineare (frequenza di cut-off di 450 Hz). Elettrogoniometri (accuracy = 0.5°) sono stati posizionati sulla parte laterale dell'articolazione del ginocchio, per misurarne l'angolo sul piano sagittale. Gli interruttori a pedale (superficie 1.21 cm²; forza di attivazione 3 N) sono stati posti sotto il tallone, la prima e la quinta testa metatarsale di ogni piede, per la misura del segnale di contatto tra piede e terreno. Dopo l'applicazione dei sensori, ogni soggetto ha camminato a piedi nudi per circa 5 minuti, seguendo il protocollo riportato da Strazza et al. (2007) [33].

4.3 Processing del segnale

Dopo l'acquisizione, i segnali degli interruttori a pedali sono stati convertiti in quattro livelli, corrispondenti a diverse fasi di andatura: heel strike (H), foot-contact (F), push-off (P) e swing (S), seguendo le indicazioni riportate in Agostini et al. [34]. Successivamente, questi segnali sono stati elaborati per identificare ogni gait cycle (GC). I segnali dell'elettrogoniometro vengono filtrati con filtro passa basso (15 Hz). Successivamente, gli angoli del ginocchio, insieme alle fasi del passo ottenuti dai segnali basografici, sono stati elaborati attraverso un filtro statistico multivariato per scartare i GC con una non sequenza fisiologica ma relativa ad accelerazione, decelerazione o inversione di marcia. Il filtro statistico multivariato ha confrontato gli angoli del ginocchio e la durata delle fasi di deambulazione di ciascun passo con il loro valore medio calcolato su tutti i passi rilevati. Se le differenze sono risultate significative (Hotelling t-test, 5%) il passo corrispondente è stato scartato. Di conseguenza, soltanto i passi che appartengono alla camminata rettilinea sono stati considerati in questo studio.

I segnali sEMG sono stati filtrati con filtro passa-alto e successivamente elaborati da un rilevatore

statistico a doppia soglia, al fine di indentificare gli intervalli di attivazione mioelettrica [35]. In breve, il rilevatore si basa sull'osservazione di m campioni successivi una volta che il segnale ha superato la prima soglia; se almeno r_0 (seconda soglia) degli m campioni successivi sono ancora al di sopra della prima soglia, si riconosce un'attivazione. L'elaborazione dei segnali, l'identificazione dell'attività muscolare e la statistical gait analysis su ogni singolo soggetto è stata effettuata off-line dal sistema Step32.

4.4 Statistical gait analysis

Per considerare la variabilità muscolare, i segnali sEMG sono stati analizzati attraverso la statistical gait analysis (SGA) per la caratterizzazione del passo, calcolando la media dei parametri spazio-temporali ed elettromiografici su centinaia di passi per soggetto [36]. Questa tecnica si basa sulla dipendenza dal GC dell'attivazione muscolare durante l'andatura [37]. Così, i segnali sEMG sono stati mediati separatamente su ogni singola modalità di attivazione. Una modalità di attivazione definisce il numero di volte che un muscolo si attiva durante un singolo GC: le n modalità di attivazione comprendono n intervalli attivi per il muscolo considerato durante il GC. Per ottenere gli intervalli medi di attivazione di ogni singola modalità, sono stati identificati gli istanti temporali di onset/offset delle attivazioni muscolari in ogni GC. I valori medi di onset/offset sono stati normalizzati, con una media di intervalli di attivazione in percentuale di GC. analisi, eseguita su numerosi passi, ha permesso di quantificare le co-attivazioni dei muscoli non solo in termini di lunghezza temporale, ma anche in termini di OCF. Quest'ultima quantifica il numero di passi in cui il muscolo considerato è reclutato con ciascuna modalità di attivazione specifica [38]. L'OCF per le n modalità di attivazione è calcolato come segue:

$$OCF = \frac{\text{numero di passi con } n \text{ intervalli di attivazione}}{\text{numero passi totali}} 100$$

Gli intervalli di attivazione medi, la frequenza di reclutamento (OCF) e le co-attivazioni muscolari sono stati ottenuti utilizzando un software su misura (MATLAB R2017a, Mathworks, USA).

I periodi di co-contrazione sono stati individuati come i periodi di sovrapposizione tra le attività di GL e VL.

4.5 Statistica

Dopo aver calcolato le co-contrazioni e le OCF, si è potuto procedere a considerare la normalità delle due distribuzioni attraverso il test di Shapiro-Wilk..

La valutazione della normalità è importante perché, a seconda che ogni variabile venga distribuita in maniera normale o non normale, ad essa vanno applicate due speciali appendici della statistica:

- statistica parametrica (per distribuzioni normali);
- statistica non parametrica (per distribuzioni non normali).

Il test più comune che confronta due gruppi è il Two-sample test (t-Test) per la statistica parametrica e il Mann-Whitney test per la statistica non parametrica. Nel mio studio è stato usato il Two-sample test per le regioni di midstance e swing e il Mann-Whitney test per le regioni di early-stance e preswing. Il livello di significatività o p-value adottato è 0.05.

Per verificare la presenza di differenze tra le medie, entrambi i test sono stati seguiti da un confronto tra i diversi p di significatività e il p-value.

5. Risultati

Di seguito verranno riportati i principali risultati del presente studio. In particolare, saranno riportate le principali modalità di attivazione di GL e di VL e le rispettive frequenze di reclutamento distinte per genere. Successivamente, saranno presentati gli intervalli medi di co-contrazione tra il GL e il VL nella popolazione maschile e femminile. Infine, verranno riportati i risultati dell'analisi statistica in cui verranno confrontate le frequenze di reclutamento nelle regioni di co-contrazione individuate.

Le regioni del ciclo del passo considerate sono: la regione early-stance (0-20%), la regione midstance (20-50%), la regione pre-swing (50-60%) e la regione swing (60-100%). L'analisi dei dati ha mostrato un'elevata variabilità dei modelli di attivazione: il GL ha mostrato sei modalità di attivazione durante la deambulazione e il VL cinque modalità di attivazione, caratterizzate da OCF differenti. Tuttavia, la modalità di attivazione 5 e 6 di GL e la modalità di attivazione 1 e 5 di VL sono stati osservati solo in 0.9%, 1.4% e 2.7% dei passi, rispettivamente. Così, quattro modalità del GAS e tre modalità del VST su cinque sono state considerate nella seguente analisi (Figura 19; Figura 20). Le frequenze di reclutamento per le modalità di GL e VL considerate hanno mostrato un'elevata variabilità nei due generi (Tabella 1; Tabella 2).

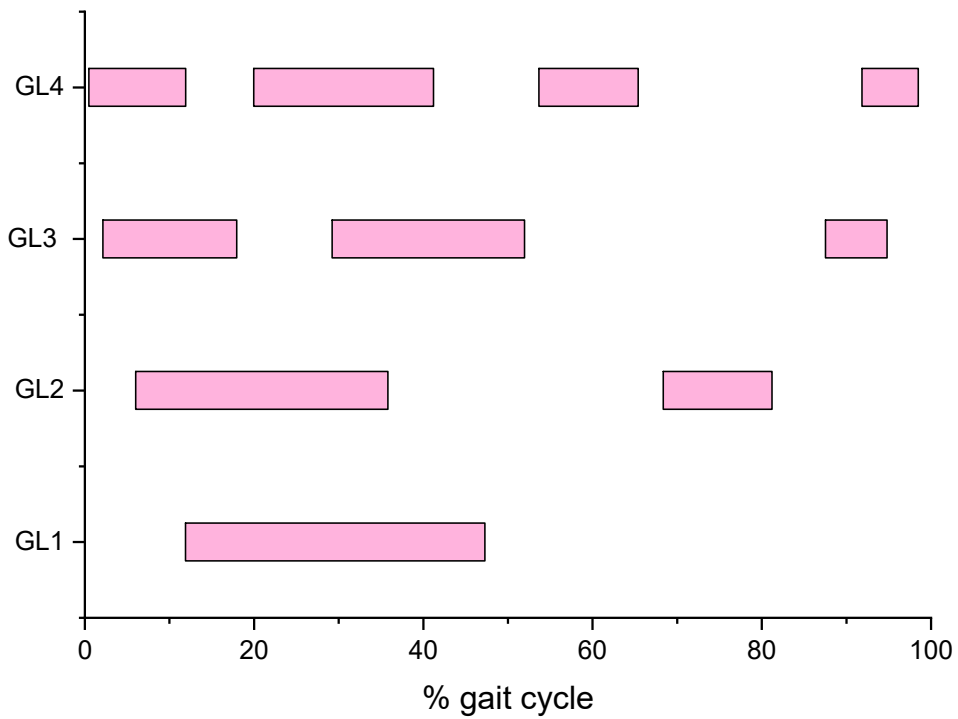
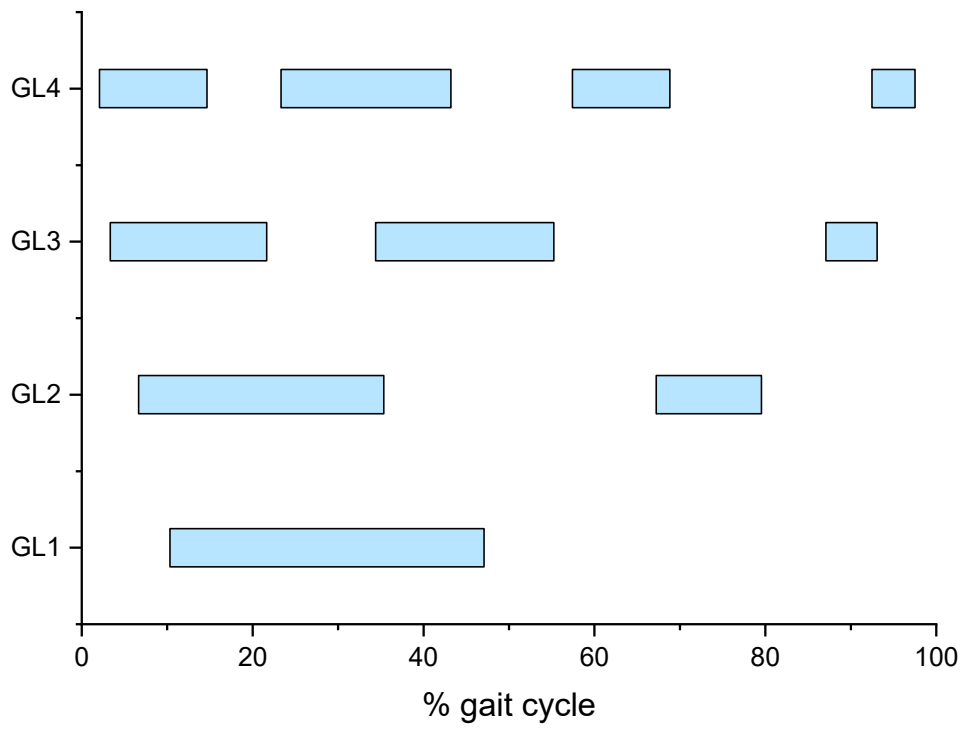


Figura 19. Principali modalità di attivazione di GL

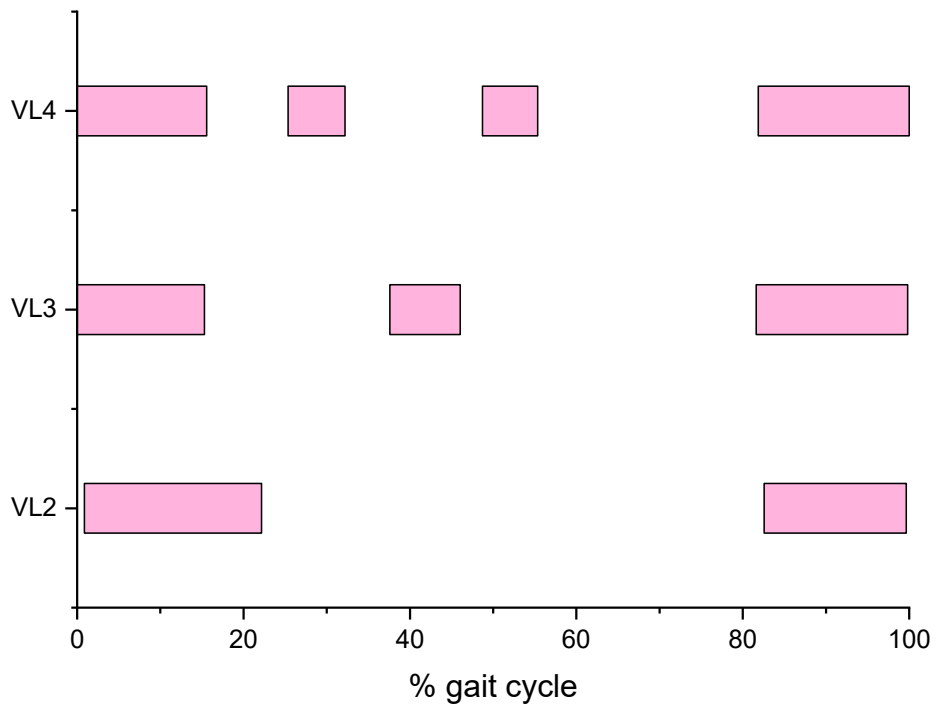
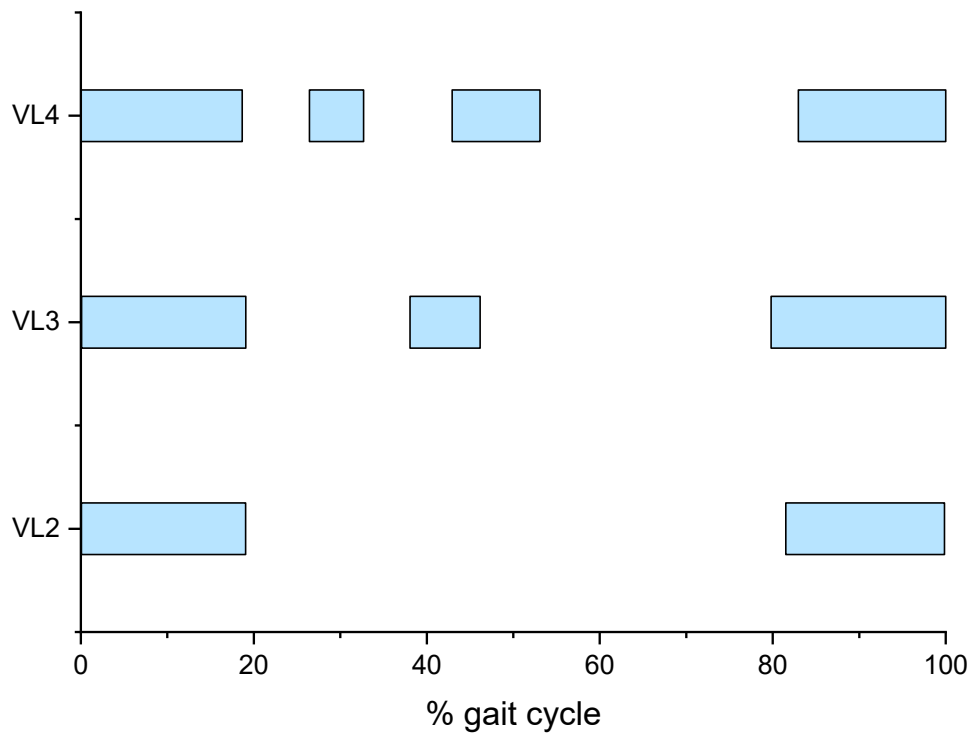


Figura 20. Principali modalità di attivazione di VL

Tabella 1. Frequenza di reclutamento delle modalità di attivazione del gastrocnemio laterale (GL) nelle donne e negli uomini. I valori riportati in percentuale del numero totale di passi.

OCF GL	Femmine	Maschi
GL1	22.8 ± 17.2	42 ± 20.1
GL2	38.5 ± 10.3	36.4 ± 10.8
GL3	28.3 ± 11.6	16.8 ± 10.3
GL4	8.8 ± 8.2	4.2 ± 5.2

Tabella 2. Frequenza di reclutamento delle modalità di attivazione del vasto laterale (VL) nelle donne e negli uomini. I valori sono riportati in percentuale del numero totale di passi.

OCF VL	Femmine	Maschi
VL2	8.6 ± 6.8	11.2 ± 11.0
VL3	7.2 ± 5.8	6.4 ± 5.0
VL4	2.9 ± 2.2	1.8 ± 1.5

Sia nei maschi che nelle femmine quando il GL ha presentato una singola attivazione, un periodo di sovrapposizione è sorto durante la fase iniziale di contatto con il piede (regione early-stance) quando il VL ha tutte le attivazioni considerate (Figura 21). Quando VL ha mostrato la modalità di attivazione 3 e 4, un'altra co-attivazione si è verificata durante la fase F.

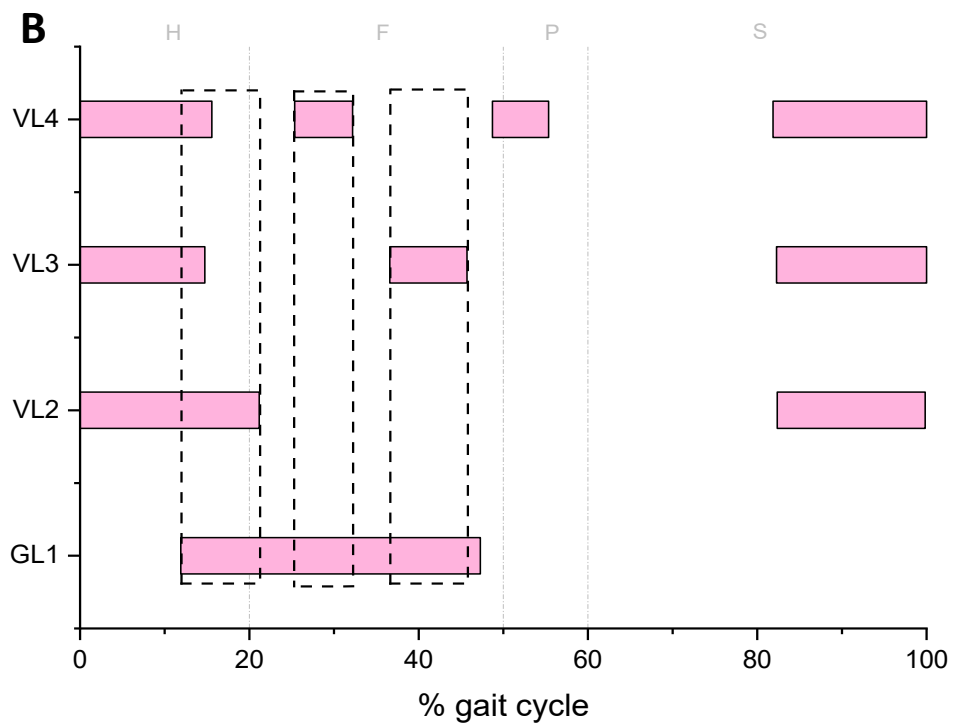
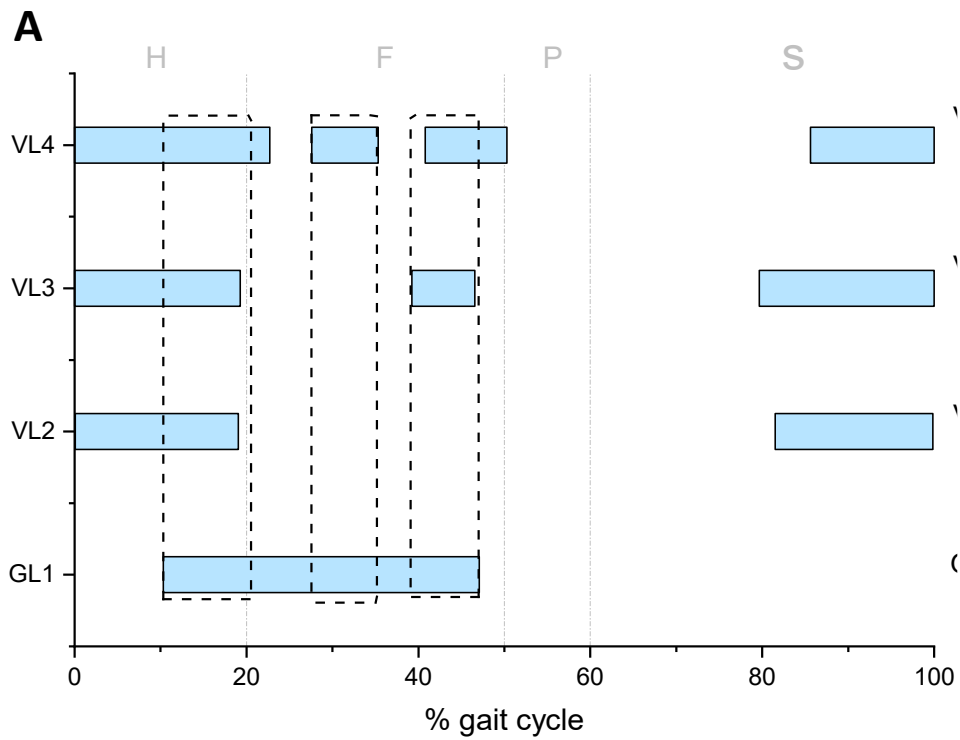


Figura 21. Intervalli medi di attivazione del VL rilevati in quei passi in cui il GL mostra 1 modalità di attivazione per gli uomini (A) e per le donne (B). Gli intervalli di co-contrazione sono evidenziati dalle caselle tratteggiate verticali. Le fasi di GC (H-F-P-S) sono indicate dalle linee tratteggiate verticali.

Considerando la modalità di attivazione 2 del GL in entrambi i gruppi (Figura 22), una co-attivazione è presente quando il VL presenta tutte e quattro le attivazioni nella fase H e un'altra co-attivazione è presente nella fase F quando è presente solo la modalità di attivazione 4 del VL.

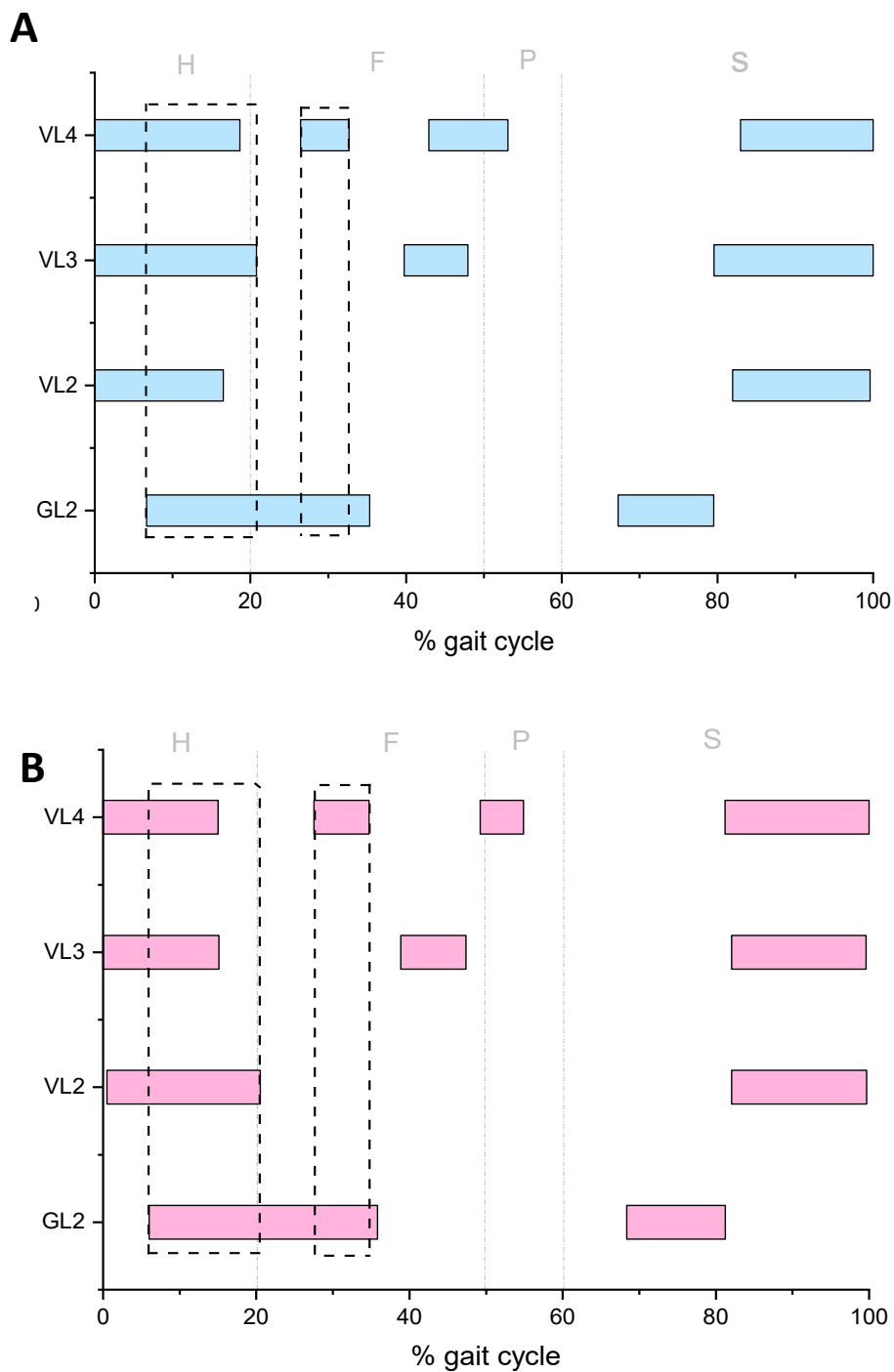


Figura 22. Intervalli medi di attivazione di VL rilevati in quei passi in cui il GL mostra la modalità 2 di attivazione negli uomini (A) e nelle donne (B). Gli intervalli di co-contrazione sono evidenziati dalle caselle tratteggiate verticali. Le fasi di GC (H-F-P-S) sono indicate dalle linee tratteggiate verticali.

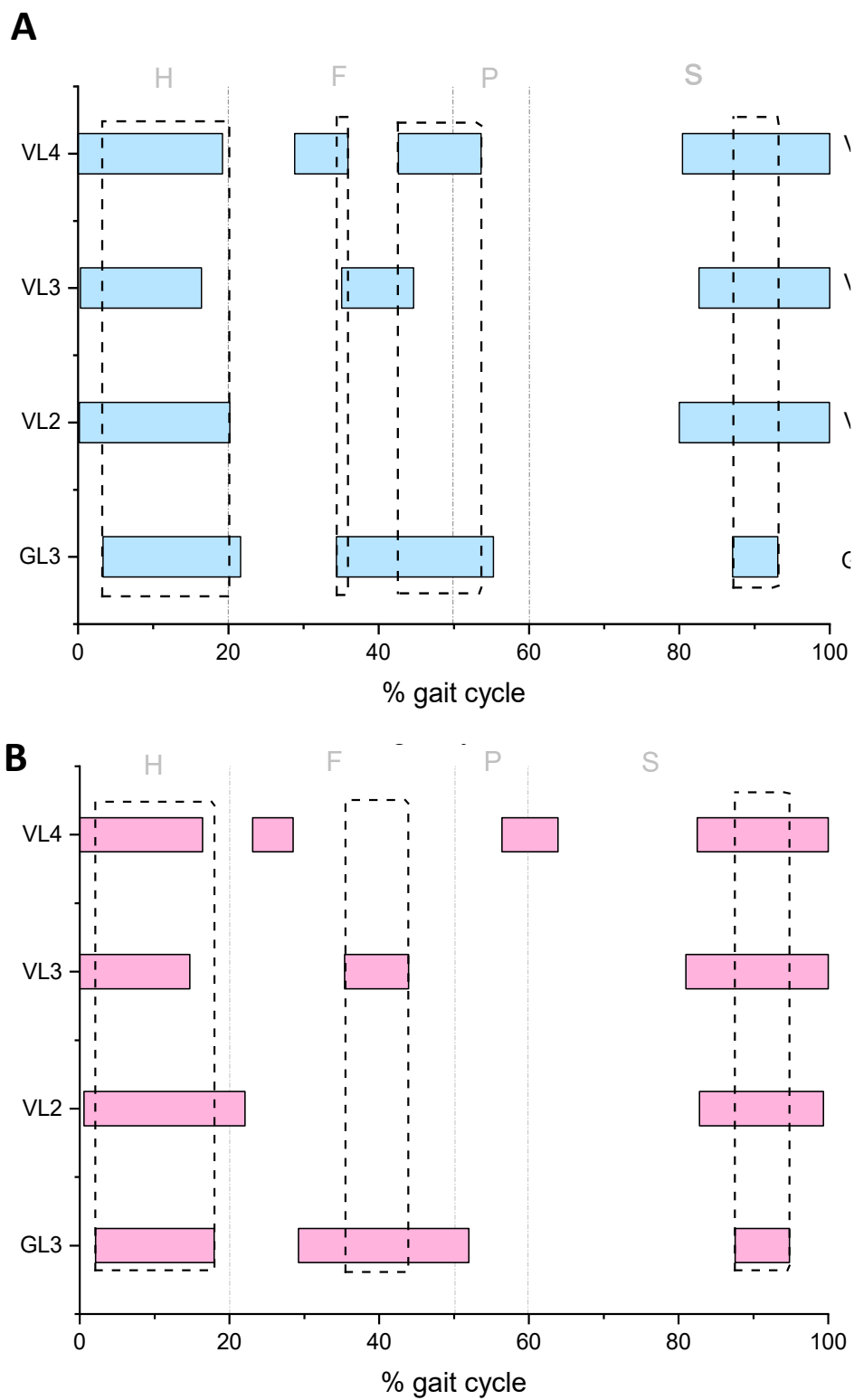


Figura 23. Intervalli medi di attivazione di VL rilevati in quei passi in cui il GL presenta la modalità 3 di attivazione negli uomini (A) e nelle donne (B). gli intervalli di co-contrazione sono evidenziati da caselle tratteggiate verticali. Le fasi di GC (H-F-P-S) sono indicate da linee tratteggiate verticali.

Quando il GL ha presentato la modalità di attivazione 3 (Figura 23), nella fase H e nella fase S sia nei maschi che nelle femmine è presente una co-attivazione quando il VL presenta tutte e quattro le modalità di attivazione. Nella fase F un'altra co-attivazione è presente nelle femmine è solo quando il VL ha la modalità di attivazione 3. Nei maschi invece la stessa co-attivazione è presente quando il VL ha, oltre alla modalità di attivazione 3, anche la modalità 4. È presente anche un'altra co-attivazione nella fase P solo nei maschi.

Se si considera la modalità di attivazione 4 del GL, nella fase H e S in entrambi i gruppi è presenta una co-attivazione quando il VL presenta tutte le attivazioni (Figura 24). Nella fase F, nei maschi la co-attivazione è presente solo quando il VL ha le modalità 3 e 4. Nelle femmine, invece, nella stessa fase è presente una co-attivazione quando il VL presenta le modalità 2, 3 e 4.

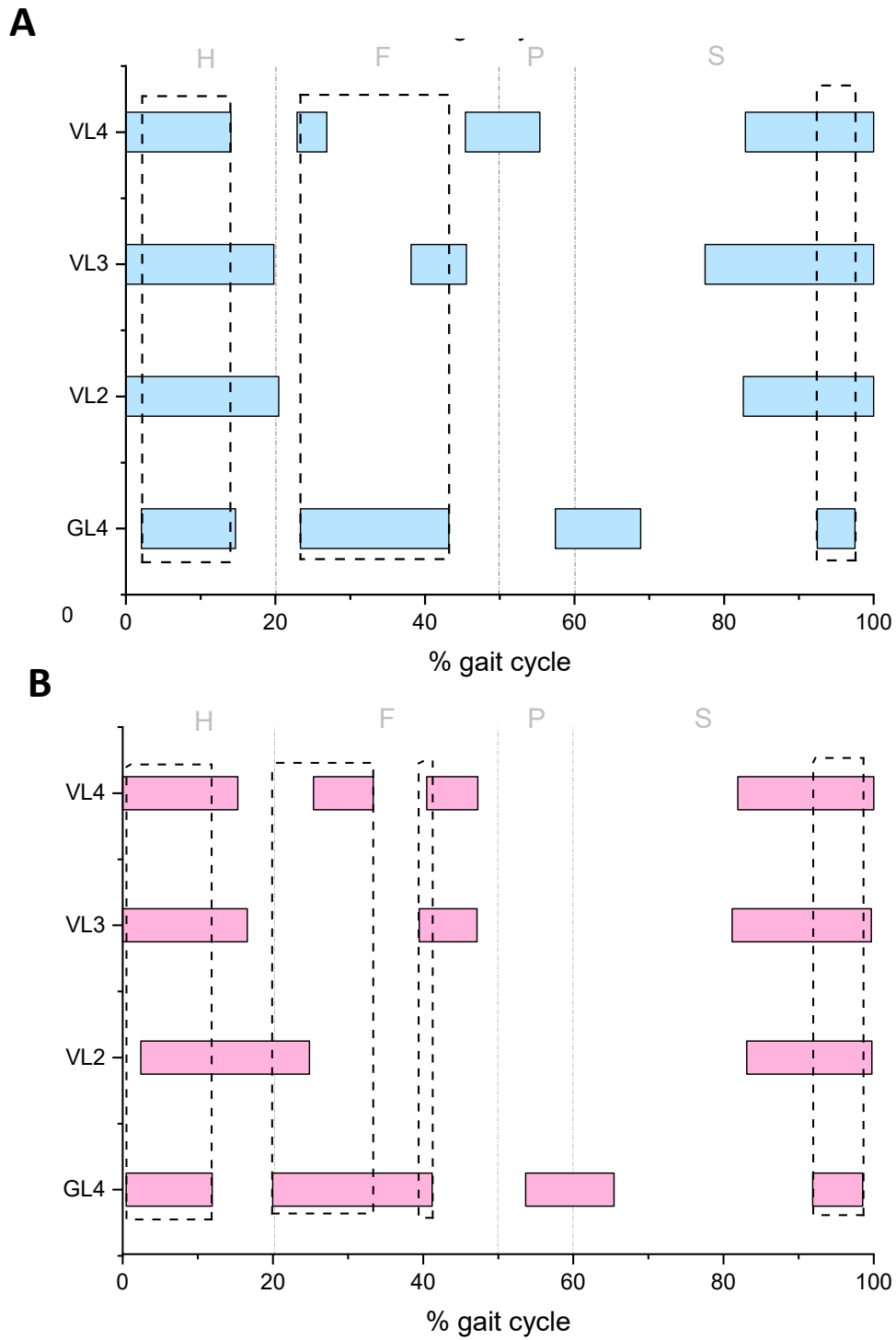
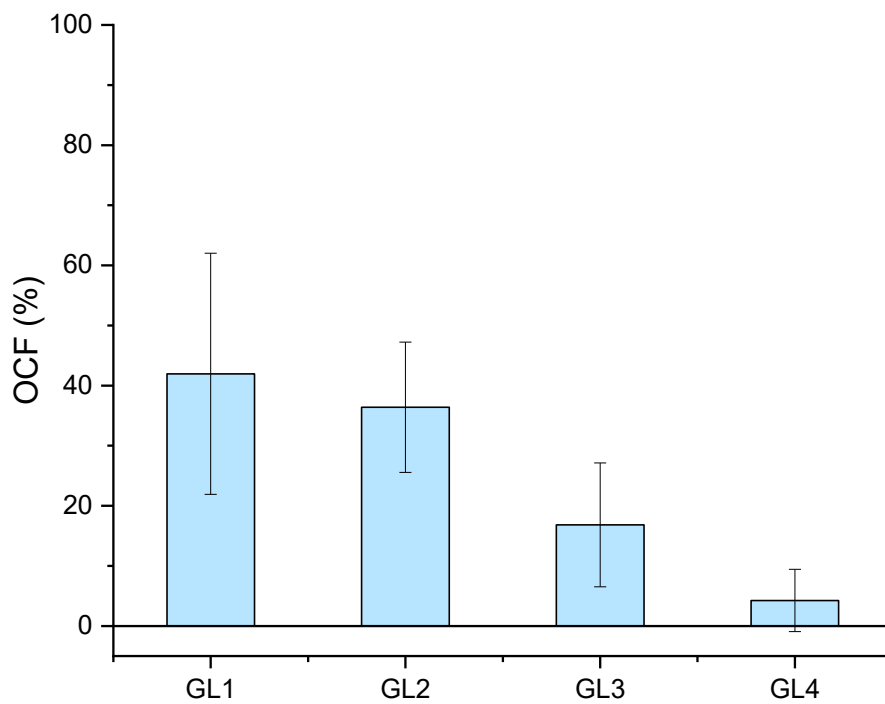


Figura 24. Intervalli medi di attivazione di VL rilevati in quei passi in cui il GL mostrava la modalità 4 di attivazione negli uomini (A) e nelle donne (B). gli intervalli di co-contrazione sono evidenziati da caselle tratteggiate verticali. Le fasi di GC (H-F-P-S) sono indicate da linee tratteggiate verticali.

Considerando la frequenza di reclutamento delle attivazioni del GL, risultano diverse differenze negli uomini e nelle donne (Figura 25).

A



B

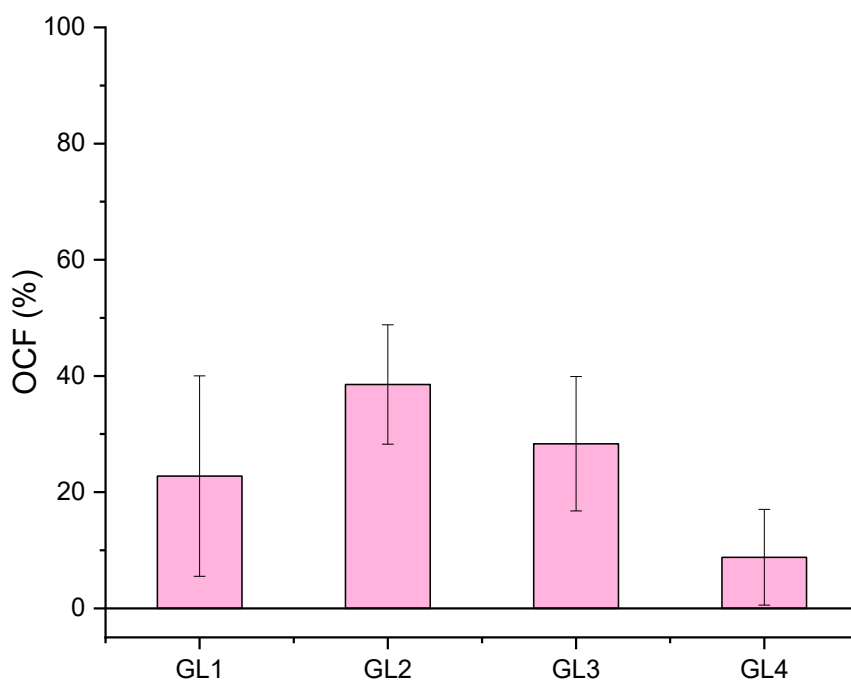
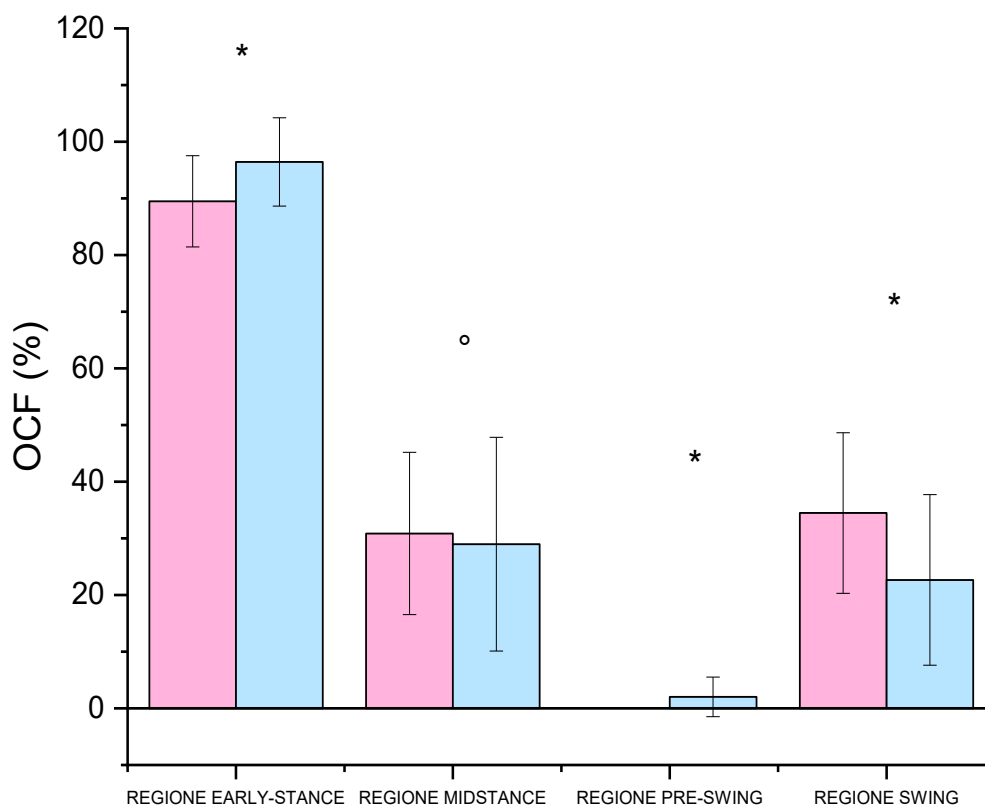


Figura 25. Frequenza di reclutamento delle 4 modalità di attivazione di GL considerate negli uomini (A) e nelle donne (B).

Analizzando statisticamente gli intervalli di co-attivazione si sono ottenuti i valori di significatività riportati nella Tabella 3. Confrontando statisticamente le distribuzioni nelle quattro regioni di co-contrazione, è possibile considerare se le distribuzioni sono significativamente differenti. I risultati ottenuti sono riportati nella Figura 26.

Tabella 3.

	p di significatività
REGIONE EARLY-STANCE	1 E-4
REGIONE MIDSTANCE	0.7
REGIONE PRE-SWING	5.1 E-8
REGIONE SWING	2.3 E-3



* Le due distribuzioni sono significativamente differenti

° Le due distribuzioni non sono significativamente differenti

Figura 26.

6. Discussione

Nel presente studio, l'attività simultanea del muscolo gastrocnemio laterale e del vasto laterale, nota come co-contrazione, è stata valutata durante il cammino di soggetti sani al fine di evidenziare eventuali differenze dovute al genere. GL è risultato attivo durante il periodo centrale della fase di stance (midstance) e VL all'inizio e alla fine del GC, in accordo con la loro attività mioelettrica riconosciuta e riportata nei principali riferimenti in letteratura [31]. Tuttavia, l'alto grado di variabilità muscolare, riportato anche in studi precedenti ed evidenziato qui nelle Figure 19 e 20, ha portato a identificare diverse regioni di co-attivazione in tutto il GC. In particolare, quattro principali regioni di co-contrazione tra GL e VL sono state riconosciute in un unico passo, sia nel gruppo femminile che in quello maschile.

Nella fase di early-stance, quando il GL presenta una sola modalità di attivazione e il VL tutte le modalità, è presente la prima co-contrazione. Nessuna differenza significativa è stata identificata tra la popolazione femminile e quella maschile negli intervalli di co-contrazione (Figura 21). All'inizio di GC, VL agisce per fornire la stabilizzazione del ginocchio, controllando la flessione dell'articolazione durante l'accettazione del carico. Sempre nella stessa fase è presente un'altra co-attivazione, quando il GL presenta la modalità 2 (Figura 22), 3 (Figura 23) e 4 (Figura 24) e il VL tutte le modalità di attivazione; anche qui non è stata riscontrata differenza nei maschi e nelle femmine. Questa co-attivazione, nota la funzione del gastrocnemio di flessione del ginocchio, potrebbe essere diretta a migliorare la stabilità del ginocchio durante il contatto con il suolo.

Nella fase di midstance, nasce una seconda co-attivazione ed è possibile evidenziare delle differenze nel sesso maschile e femminile. In questo periodo, GL esercita la sua funzione di muscolo estensore, frenando il rotolamento della tibia e decelerando il movimento dell'arto inferiore in avanti. Nella

Figura 21 sono presenti due co-contrazioni in ambo i sessi. È presente una co-attivazione sia nei maschi che nelle femmine quando il VL ha la modalità 4 di attivazione. In questa fase c'è una differenza tra i sessi nella seconda co-contrazione perché nei maschi si ha co-contrazione quando il VL presenta la modalità 3 e 4 mentre nelle femmine il VL presenta solo la modalità 4 di attivazione. Questo probabilmente andrà a influenzare le relative frequenze di reclutamento delle co-contrazioni e la loro dipendenza dal genere. Nella figura 22 è presente la stessa co-attivazione in entrambi i sessi quando il VL ha la modalità 4 di attivazione. Nella figura 23 si possono notare alcune differenze tra gli uomini e le donne. Nella figura 23 B è presente una co-contrazione quando il VL ha la modalità 3 di attivazione. A differenza, nei maschi, è presente una prima co-attivazione molto breve e poi un'altra di durata maggiore quando il VL presenta la modalità 3 e 4. Quando invece si passa alla modalità 4 di attivazione di GL, nella fase di midstance è possibile distinguere nelle femmine una prima co-contrazione quando il VL presenta la modalità 2 e 4 e un'altra co-contrazione più breve quando il VL presenta la modalità 3 e 4. Nei maschi invece è presente una co-contrazione di durata maggiore quando il VL è attivo nella modalità 3 e 4. Questa attività muscolare potrebbe essere correlata ad una necessità occasionale di un'ulteriore estensione del ginocchio, considerando che in questa fase l'estensione avviene senza una partecipazione diretta del gruppo del quadricipite femorale. Considerando l'OCF (29.3 ± 7.3 % per le donne e 29 ± 5.1 % per gli uomini), è possibile considerare che le co-attivazioni GL/VL sono presenti in questa fase allo stesso modo in ambo i sessi. L'attività di GL durante la fase di pre-swing è correlata alla flessione plantare necessaria per il sollevamento del tallone. Il VL agisce per la stabilizzazione della rotula e il controllo della flessione del ginocchio prima di entrare nella fase di oscillazione. Particolari differenze tra i maschi e le femmine possono essere notate nella fase di pre-swing, in quanto nella figura 21, 22 e 24 non è presente nessuna co-contrazione. Una co-contrazione di durata molto breve è presente solo in

figura 23 A. Pertanto, anche in base all'OCF relativamente bassa per gli uomini e nulla per le donne, l'attività simultanea dei due muscoli potrebbe creare degli effetti sull'articolazione del ginocchio.

L'ultimo periodo di sovrapposizione è stato individuato nella fase tardiva di swing in entrambi i gruppi quando il GL ha modalità di attivazione 3 e 4. In questo caso, il vasto esercita la sua nota funzione di estensore del ginocchio, preparando il piede al successivo contatto con il suolo [31]. La co-attivazione in questa fase avviene con un alto OCF per le donne ($34.5 \pm 8.6 \%$) e un valore inferiore per gli uomini ($22.7 \pm 8.6 \%$).

Oltre alle differenze rilevate tra i maschi e le femmine negli intervalli di co-contrazione, sono state osservate delle differenze significative in termini di OCF (Figura 25), e cioè in termini del numero (%) di passi in cui si verifica una co-contrazione normalizzato al numero di passi totali. La modalità di attivazione con una sola attivazione del GL è più frequente nel cammino della popolazione maschile. Differentemente, la popolazione femminile sembra preferire modalità con un numero più elevato di attivazioni (3 e 4). Caso particolare è quando il GL ha attivazione 2 in cui la frequenza di reclutamento è molto simile tra gli uomini e le donne.

Questi risultati sono supportati dall'analisi statistica, tre regioni di co-contrazione su quattro risultano significativamente differenti ($p < 0.05$) dal punto di vista statistico (Figura 26). In particolare, nella regione di early-stance e nella regione di pre-swing la popolazione maschile presenta una maggior frequenza di co-attivazioni rispetto alle donne, mentre nella regione di swing sono presenti co-attivazioni più frequenti per la popolazione femminile. Nella regione di midstance ($p > 0.05$) le due distribuzioni non sono significativamente differenti.

In conclusione, i risultati del presente studio suggeriscono la presenza di differenze di co-contrazione GL e VL tra il genere maschile e femminile, principalmente in termini di frequenza di reclutamento contemporaneo dei due muscoli, più che in termini delle dimensioni delle regioni di

co-contrazione. Quanto trovato può risultare utile per capire meglio le differenze tra popolazioni femminili e maschili nei diversi meccanismi del cammino e per sviluppare modelli biomeccanici differenziati per genere, al fine di approfondire la stabilità dell'articolazione del ginocchio. Inoltre, le presenti considerazioni possono rivelarsi utili anche nello studio di differenti patologie o disordini motori, tra cui di particolare interesse sembrano essere quei meccanismi che possano portare all'elevata incidenza di rotture del legamento crociato anteriore individuata frequentemente nella popolazione femminile.

Bibliografia

- [1] Falconer K., Winter D.A. Quantitative assessment of co-contraction at the ankle joint in walking. *Electromyography Clinical Neurophysiol.* Volume 25(2-3), 1985, Pages 135-149.
- [2] Mengarelli A., Maranesi E., Burattini L., Fioretti S., Di Nardo F. Co-contraction activity of ankle muscles during walking: a gender comparison. *Biomedical Signal Processing Control.* Volume 33 (1), 2017, Pages 1–9.
- [3] Rosa M.C., Marques A., Demain S., Metcalf C., Rodrigues J. Methodologies to assess muscle co-contraction during gait in people with neurological impairment – A systematic literature review. *Journal of Electromyography and Kinesiology.* Volume 24(2), 2014, Pages 179-191.
- [4] Solomonow M., Baratta R.V., Zhou B.H., Shojij H., Bose W., Beck C., D'Ambrosia R. The synergistic action of the anterior cruciate ligaments and thigh muscles in maintaining joint stability. *The American Journal of Sports Medicine.* Volume 15, 1987, Pages 207–213.
- [5] Chmielewski T.L., Rudolph K.S., Snyder-Mackler L. Development of dynamic knee stability after acute ACL injury. *Journal of Electromyography and Kinesiology.* Volume 12, 2002, Pages 267-274.
- [6] Li Y., Jupil K., Walker M.A., Brown C.N., Schmidt J.D., Kim S.K., Simpson K.J. Does chronic ankle instability influence lower extremity muscle activation of females during landing? *Journal of Electromyography and Kinesiology.* Volume 38, 2018, Pages 81–87.
- [7] Mengarelli A., Maranesi E., Barone V., Burattini L., Fioretti S., Di Nardo F. Evaluation of gender-related differences in co-contraction activity of shank muscles during gait. In: *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS,* 2015, Pages 6066–6069.

- [8] Chmielewski T., Hurd W., Snyder-Mackler L. Elucidation of a potentially de-stabilizing control strategy in ACL deficient non-copers. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. Volume 15 (1), 2005, Pages 83-92.
- [9] Doorenbosch C., Harlaar J. A clinically applicable EMG-force model to quantify active stabilization of the knee after a lesion of the anterior cruciate ligament. *Clinical Biomechanics*. Volume 18, 2003, Pages 142–149.
- [10] O'Connor J. Can muscle co-contraction protect knee ligaments after injury or repair? *The Journal of Bone & Joint Surgery*. Volume 75 (1), 1993, Pages 41–48.
- [11] Dargel J., Gotter M., Mader K., Pennig D., Koebke J., Schmidt-Wiethoff R. Biomechanics of the anterior cruciate ligament and implications for surgical reconstruction. *Strategies in Trauma and Limb Reconstruction* Volume 2 (1), 2007, Pages 1–12.
- [12] Mokhtarzadeh H., Yeow C.H., Hong Goh J.C., Oetomo D., Malekipour F., Lee P.V. Contributions of the Soleus and Gastrocnemius muscles to the anterior cruciate ligament loading during single-leg landing. *Journal of Biomechanics*. Volume 46 (11), 2013, Pages 1913–1920.
- [13] Podraza J.T., White S.C. Effect of knee flexion angle on ground reaction forces, knee moments and muscle co-contraction during an impact-like deceleration landing: Implications for the non-contact mechanism of ACL injury. *The Knee*. Volume 17 (4), 2010, Pages 291–295.
- [14] Morrison J.B. The mechanics of the knee joint in relation to normal walking. *Journal of Biomechanics*. Volume 3 (1), 1970, Pages 51–61.
- [15] Baratta R., Solomonow M., Zhou B.H., Letson D., Chuinard R., D'Ambrosia R. Muscular coactivation. the role of the antagonist musculature in maintaining knee stability. *The American Journal of Sports Medicine*. Volume 16 (2), 1988, Pages 113–122.

- [16] Adouni M., Shirazi-Adl A., Marouane H. Role of gastrocnemius activation in knee joint biomechanics: gastrocnemius acts as an ACL antagonist. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. Volume 19 (4), 2015, Pages 376–385.
- [17] Fleming B.C., Renstrom P.A., Ohlen G., Johnson R.J., Peura G.D., Beynnon B.D., Badger G.J., 2001. The gastrocnemius muscle is an antagonist of the anterior cruciate ligament. *Journal of Orthopaedic Research*. Volume 19 (6), 2001, Pages 1178-1184.
- [18] Klyne D.M., Keays S.L., Bullock-Saxton J.E., Newcombe P.A. The effect of anterior cruciate ligament rupture on the timing and amplitude of gastrocnemius muscle activation: a study of alterations in EMG measures and their relationship to knee joint stability. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. Volume 22 (3), 2012, Pages 446–455.
- [19] Kernozek T.W., Ragan R.J. Estimation of anterior cruciate ligament tension from inverse dynamics data and electromyography in females during drop landing. *Clinical Biomechanics*. Volume 23 (10), 2008, Pages 1279–1286.
- [20] Andriacchi T.P., Dyrby C.O. Interactions between kinematics and loading during walking for the normal and ACL deficient knee. *Journal of Biomechanics*. Volume 38 (2), 2005, Pages 293–298
- [21] Gao B., Zheng N. Alterations in three-dimensional joint kinematics of anterior cruciate ligament-deficient and -reconstructed knees during walking. *Clinical Biomechanics*. Volume 25 (3), 2010, Pages 222–229.
- [22] Shanbehzadeh S., Bandpei M.A.M., Ehsani F. Knee muscle activity during gait in patients with anterior cruciate ligament injury: a systematic review of electromyographic studies. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. Volume 25 (5), 2017, Pages 1432–1442.

- [23] Taylor K.A., Cutcliffe H.C., Queen R.M., Utturkar G.M., Spritzer C.E., Garrett W.E., DeFrate L.E. In vivo measurement of ACL length and relative strain during walking. *Journal of Biomechanics*. Volume 46 (3), 2013, Pages 478–483.
- [24] Wu J.L., Hosseini A., Kozanek M., Gadikota H.R., Gill T.J., Li G. Kinematics of the anterior cruciate ligament during gait. *The American Journal of Sports Medicine*. Volume 38 (7), 2010, Pages 1475–1482.
- [25] Mengarelli A., Gentili A., Strazza A., Burattini L., Fioretti S., Di Nardo F. Co-activation patterns of gastrocnemius and quadriceps femoris in controlling the knee during walking. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. Volume 42, 2018, Pages 117-122.
- [26] Di Nardo F., Strazza A. Co-activation of Knee Muscles in Female vs. Male Adults. XV Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing – MEDICON 2019 In: *Proceedings of MEDICON 2019*, 2019, Pages 167-173.
- [27] Mengarelli A, Maranesi E., Burattini L., Fioretti S., Di Nardo F. Co-contraction activity of ankle muscles during walking: A gender comparison. *Biomedical Signal Processing and Control*. Volume 33, 2017, Pages 1-9.
- [28] Bouchouras G., Sofianidis G., Patsika G., Kellis E., Hatzitaki V. Women with knee osteoarthritis increase knee muscle co-contraction to perform stand to sit. *Aging Clinical and Experimental research*. Volume 32, 2020, Pages 655-662.
- [29] Di Nardo F., Mengarelli A., Strazza A., Agostini V., Knaflitz, M., Burattini, L., Fioretti, S. A new parameter for quantifying the variability of surface electromyographic signals during gait: The occurrence frequency. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. Volume 36, 2017b, Pages 25–33.

- [30] G. Ambrosi, D. C. *Anatomia dell'uomo - Seconda edizione*. Milano: Edi.Ermes s.r.l., 2006, Pages 68-572
- [31] Perry J. *The Gait cycle, Gait Analysis Normal and pathological function*. USA: Slack Inc, 1992, Pages 1-111
- [32] Le P., Best T.M., Khan S.N., Mendel E., Marras W.S. A review of methods to assess coactivation in the spine. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. Volume 32, 2017, Pages 51-60.
- [33] Hermens H.J., Freriks B., Disselhorst-Klug C., Rau G.,. Development of recommendations for sEMG sensors and sensor placement procedures. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. Volume 10 (5), 2000, Pages 361–374.
- [34] Strazza A., Mengarelli A., Fioretti S., Burattini L., Agostini V., Knaflitz M., Di Nardo F. Surface-EMG analysis for the quantification of thigh muscle dynamic co-contractions during normal gait. *Gait Posture*. Volume 51, 2017, Pages 228–233.
- [35] Agostini V., Balestra G., Knaflitz M. Segmentation and classification of gait cycles. *IEEE Transaction on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. Volume 22 (5), 2014, Pages 946–952.
- [36] Bonato P., D'Alessio T., Knaflitz M.,. A statistical method for the measurement of muscle activation intervals from surface myoelectric signal during gait. *IEEE Transaction on Biomedical Engineering*. Volume 45 (3), 1998, Pages 287–299.
- [37] Di Nardo F., Fioretti S. EMG-based analysis of treadmill and ground walking in distal leg muscles. In: Roa Romero, L. (Ed.), *XIII Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing 2013*. IFMBE Proceedings, Volume 41, 2014, Pages 611–614.

[38] Di Nardo F., Mengarelli A., Burattini L., Maranesi E., Agostini V., Nascimbeni A., Knaflitz M., Fioretti S. Normative EMG patterns of ankle muscle co-contractions in school-age children during gait. *Gait Posture*. Volume 46, 2016, Pages 161–166.

