

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Biomedica**

Tesi di Laurea Magistrale

**Analisi del cammino in pazienti post ictus trattati
con tossina botulinica**



Relatori

Prof. Laura Gastaldi
Elisa Panero, PhD
Prof. Giuseppe Massazza

Candidato

Ilaria Giuseppina Porco

Anno accademico 2020/2021

Sommario

Abstract	5
Abstract	6
Introduzione	7
Capitolo 1	9
1.1 Le componenti ossee del complesso gamba-caviglia-piede.....	9
1.2 I muscoli del complesso gamba-caviglia-piede.....	16
1.3 I movimenti del complesso gamba-caviglia-piede	22
Capitolo 2	25
2.1 L'ictus	25
2.2 La spasticità del complesso gamba-caviglia-piede.....	31
2.3 La tossina botulinica.....	33
Capitolo 3	37
3.1 La deambulazione.....	37
3.2 L'analisi del cammino.....	45
3.3 Il sistema Vicon-Nexus.....	53
Capitolo 4	58
4.1 Valutazione della cinematica per pazienti con piede equinovaro post ictus	58
4.2 Valutazione dei parametri spazio-temporali per pazienti con piede equinovaro post ictus.....	62
4.3 Valutazione del segnale EMG per pazienti con piede equinovaro post ictus	64
4.4 Valutazioni effettuate mediante pedane di forza per pazienti con piede equinovaro post ictus.....	65
4.5 Valutazioni cliniche per pazienti con piede equinovaro post ictus...	69
Capitolo 5	71
5.1 Materiali e metodi	71

5.2	Analisi della cinematica articolare pre iniezione di tossina botulinica	73
5.3	Analisi dei parametri spazio-temporali pre iniezione di tossina botulinica.....	97
Capitolo 6		100
6.1	Analisi della cinematica dell'anca nel piano sagittale post-iniezione di tossina botulinica.....	100
6.2	Analisi della cinematica del ginocchio nel piano sagittale post-iniezione di tossina botulinica.....	116
6.3	Analisi della cinematica della caviglia nel piano sagittale post-iniezione di tossina botulinica.....	132
6.4	Analisi della cinematica della caviglia nei piani frontale e trasversale post-iniezione di tossina botulinica.....	149
6.5	Analisi dei parametri spazio-temporali post-iniezione di tossina botulinica.....	166
6.6	Quadro riassuntivo delle osservazioni.....	176
Capitolo 7		183
Capitolo 8		186
Indice delle figure		189
Indice delle tabelle		199
Bibliografia		202

Abstract

L'ictus è attualmente una delle principali cause di disabilità in tutto il mondo. È noto che i pazienti che sopravvivono ad un ictus presentano spesso una spasticità muscolare che ne ostacola fortemente i movimenti fino ad impedire loro lo svolgimento delle più basilari azioni quotidiane. È noto che l'inoculazione di tossina botulinica nel muscolo affetto da spasticità riduca temporaneamente i sintomi di quest'ultima.

L'obiettivo di questa tesi è di evidenziare l'effetto della tossina botulinica sulla cinematica articolare e sui parametri spazio-temporali acquisiti mediante "analisi del cammino" in pazienti post-ictus con piede equinovaro.

Sono stati analizzati sei soggetti. Ognuno di essi è stato sottoposto inizialmente ad analisi del cammino, poi ha ricevuto un'iniezione di tossina botulinica nel muscolo della gamba affetto da spasticità, ed infine è stato sottoposto ad analisi del cammino a distanza di 30, 90 e 120 giorni dall'iniezione. Per quattro dei soggetti analizzati è stata effettuata una analisi del cammino supplementare a distanza di 60 giorni dall'iniezione. Durante ogni analisi, per tutti i pazienti sono stati ricavati, per entrambi gli arti, i dati della cinematica articolare di anca, ginocchio e caviglia, e i relativi parametri spazio-temporali.

Il confronto tra i risultati delle analisi del cammino alle date prestabilite ha evidenziato l'effetto della tossina botulinica, indicato da cambiamenti nelle curve di cinematica articolare e da differenze nei valori dei parametri spazio temporali. Alla luce di questi risultati, è stato possibile identificare i parametri spazio temporali e i punti significativi delle curve cinematiche maggiormente influenzati dall'effetto della tossina, e valutare le correlazioni tra essi.

Ulteriori studi futuri, basati su un campione più ampio di soggetti affetti, potrebbero confermare sia le principali variazioni delle curve che i parametri spazio temporali maggiormente influenzati dall'effetto della tossina botulinica.

Abstract

Stroke is currently one of the leading causes of disability worldwide. It is known that patients who survive to a stroke often show a muscle spasticity, which greatly hinders their movements and prevents them from carrying out the most basic daily actions. It is known that botulinum toxin inoculations in the affected muscles temporary reduces spasticity's symptoms.

The aim of this thesis is to highlight the effect of botulinum toxin on joint kinematics and on the spatio-temporal parameters acquired through "gait analysis" in post-stroke patients affected by equinovarus foot.

Six subjects were analysed. For each of them, a gait analysis session was initially performed, then they received a botulinum toxin injection into the muscle affected by spasticity, and finally further gait analysis were performed at 30, 90 and 120 days after the injection. An additional gait analysis was performed on four of the subjects analysed 60 days after the injection. During each analysis, for all patients, the kinematics of hip, knee and ankle were obtained for both limbs, and also the relative spatio-temporal parameters.

The comparison between the results of gait analyses at the predetermined dates highlighted the effect of botulinum toxin, indicated by both the changes in the kinematics curves and differences in the values of the spatio-temporal parameters. In view of the results, it was possible to identify the spatio-temporal parameters and the significant points of the kinematics curves most influenced by the toxin effect, and to evaluate the correlations between them.

Further future studies, on a larger sample of affected subjects, could confirm both the main variations of the curves and the spatio-temporal parameters most influenced by the effect of botulinum toxin.

Introduzione

L'ictus è considerata una delle principali cause di disabilità motoria, in quanto i pazienti che vi sopravvivono presentano spesso una spasticità muscolare che ne ostacola fortemente i movimenti, fino ad impedire loro lo svolgimento delle più basilari azioni quotidiane. La tossina botulinica è una proteina nota per la sua capacità di inibire la contrazione muscolare riducendo temporaneamente i sintomi della spasticità.

Sei pazienti con spasticità post ictus e piede equinovaro sono stati oggetto di questo studio, e ciascuno di essi è stato sottoposto ad un inoculo di tossina botulinica nel muscolo della gamba affetto da spasticità. L'obiettivo della tesi è quello di evidenziare i cambiamenti indotti dalla tossina botulinica mediante osservazione delle curve cinematiche di anca, ginocchio e caviglia e dei parametri spazio temporali acquisiti mediante analisi del cammino. Per ciascun paziente, di ogni articolazione si sono valutati prima dell'iniezione e a distanza di 30, 60, 90 e 120 giorni, la posizione della curva cinematica e la sua forma, mettendole a confronto con gli andamenti fisiologici presenti in letteratura e con i risultati ottenuti ai controlli precedenti e successivi, in modo da cogliere eventuali miglioramenti. Lo stesso tipo di valutazione è stata fatta per i parametri spazio temporali.

La tesi è strutturata come segue:

- Il Capitolo 1 descrive le componenti ossee e muscolari del complesso gamba-caviglia-piede e i suoi movimenti.
- Il Capitolo 2 introduce le conseguenze dell'ictus sul complesso piede caviglia e descrive l'effetto della tossina botulinica sulla spasticità.
- Il Capitolo 3 riassume i principali fattori della deambulazione, le modalità di analisi del cammino e un possibile sistema di acquisizione di analisi del cammino.
- Il Capitolo 4 presenta il panorama di letteratura scientifica inerente la valutazione della cinematica, dei parametri spazio-temporali, del segnale elettromiografico e dei parametri clinici in pazienti con piede equinovaro post ictus.
- Il Capitolo 5 presenta le valutazioni effettuate nell'ambito del presente lavoro di tesi su sei pazienti con piede equinovaro post-ictus, prima dell'inoculazione della tossina botulinica.
- Il Capitolo 6 presenta le valutazioni effettuate nell'ambito del presente lavoro di tesi sui medesimi sei pazienti, a distanza di 30, 60 90 e 120 giorni dall'inoculazione della tossina botulinica.

- Il Capitolo 7 discute i risultati ottenuti nel presente lavoro di tesi alla luce di studi analoghi di letteratura internazionale.
- Il Capitolo 8 traccia le considerazioni conclusive ricavate dalla sperimentazione effettuata.

Capitolo 1

Anatomia del complesso gamba-caviglia-piede

Il movimento del corpo umano nello spazio è il risultato dell'azione coordinata di un complesso sistema di leve, costituito delle ossa, le quali vengono messe in moto dall'azione che i muscoli esercitano su di esse. Le zone di interazione tra un osso e l'altro sono dette articolazioni, ed in base alla forma che le superfici ossee assumono al loro interno, queste possono dare o meno origine a diversi tipi di movimento. Il complesso gamba-caviglia-piede è costituito dalle ossa del piede e da quelle della gamba che vengono messe in moto dai muscoli estrinseci (localizzati nella gamba) e dai muscoli intrinseci (localizzati nel piede). Oltre a permettere il generico movimento del piede nello spazio, il complesso gamba-caviglia-piede risulta fondamentale, in quanto è in parte responsabile della catena di movimenti che permettono al corpo umano di camminare.

1.1 Le componenti ossee del complesso gamba-caviglia-piede

Il complesso gamba-caviglia-piede è costituito da numerose ossa, come mostrato in **Figura 1**, localizzate nella gamba (tibia e perone) o nel piede (astragalo [o talo], calcagno, osso navicolare [o scafoide], osso cuboide, ossa cuneiformi, ossa metatarsali e falangi). Le ossa del piede possono essere suddivise in tre gruppi, in base al loro posizionamento (**Figura 2**): ossa appartenenti al retropiede (in verde), ossa appartenenti al mesopiede (in arancione) ed ossa appartenenti all'avampiede (in azzurro).

Il complesso gamba-caviglia-piede è in grado di garantire stabilità e resistenza al peso del corpo, grazie alla disposizione delle ossa in tre archi, come mostrato in **Figura 3**:

- Arco longitudinale mediale, composto da: calcagno, astragalo, osso navicolare, ossa cuneiformi e tre ossa metatarsali.
- Arco longitudinale laterale, composto da: calcagno, osso cuboide e due ossa metatarsali laterali.

- Arco trasverso, composto da: ossa cuneiformi e osso cuboide.

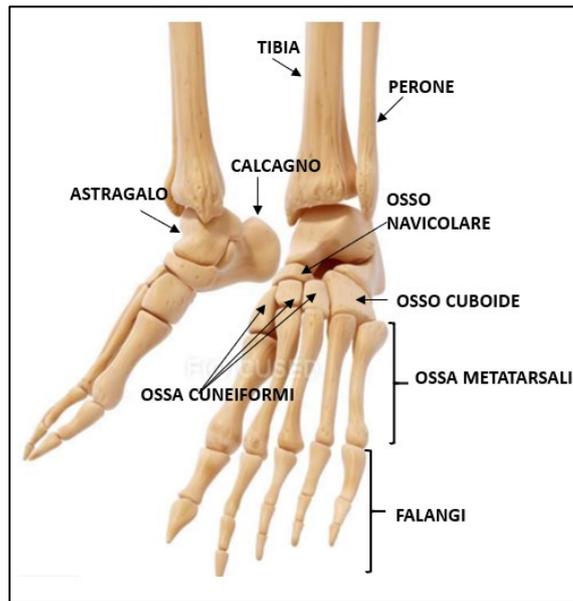


Figura 1 Ossa del complesso gamba-caviglia-piede [a]

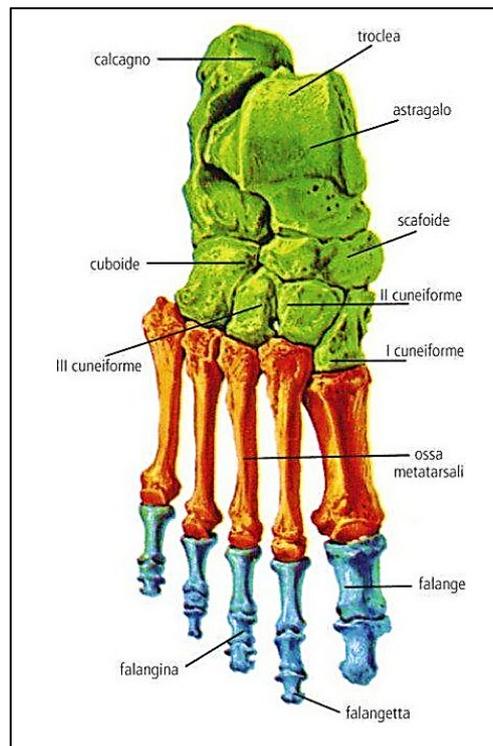


Figura 2 Suddivisione in zone delle ossa del piede [b]

Le ossa sono collegate tra di loro mediante delle bande di tessuto fibroso chiamate “legamenti”, il cui spessore cambia a seconda dell’ampiezza del movimento relativo che i segmenti ossei possono compiere. In generale, essendo composti per la maggior parte

da fibre elastiche, il compito dei legamenti risulta essere, oltre al semplice collegamento, quello di consentire il movimento relativo tra le ossa, evitando che questo raggiunga ampiezze eccessive. Nel caso del complesso gamba-caviglia-piede i legamenti vengono riportati nelle **Figure 4, 5, 6 e 7**.

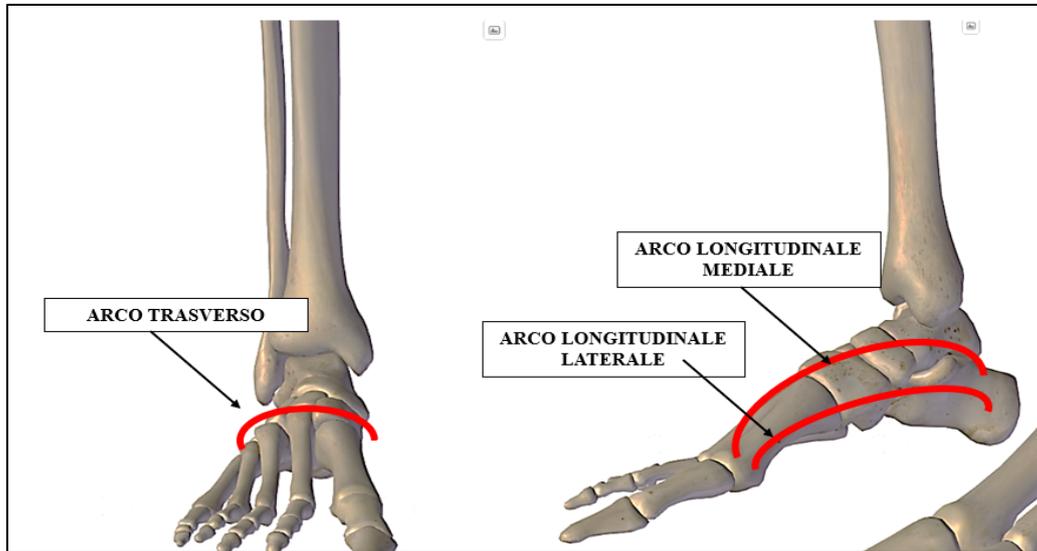


Figura 3 Archi formati dalle ossa del piede

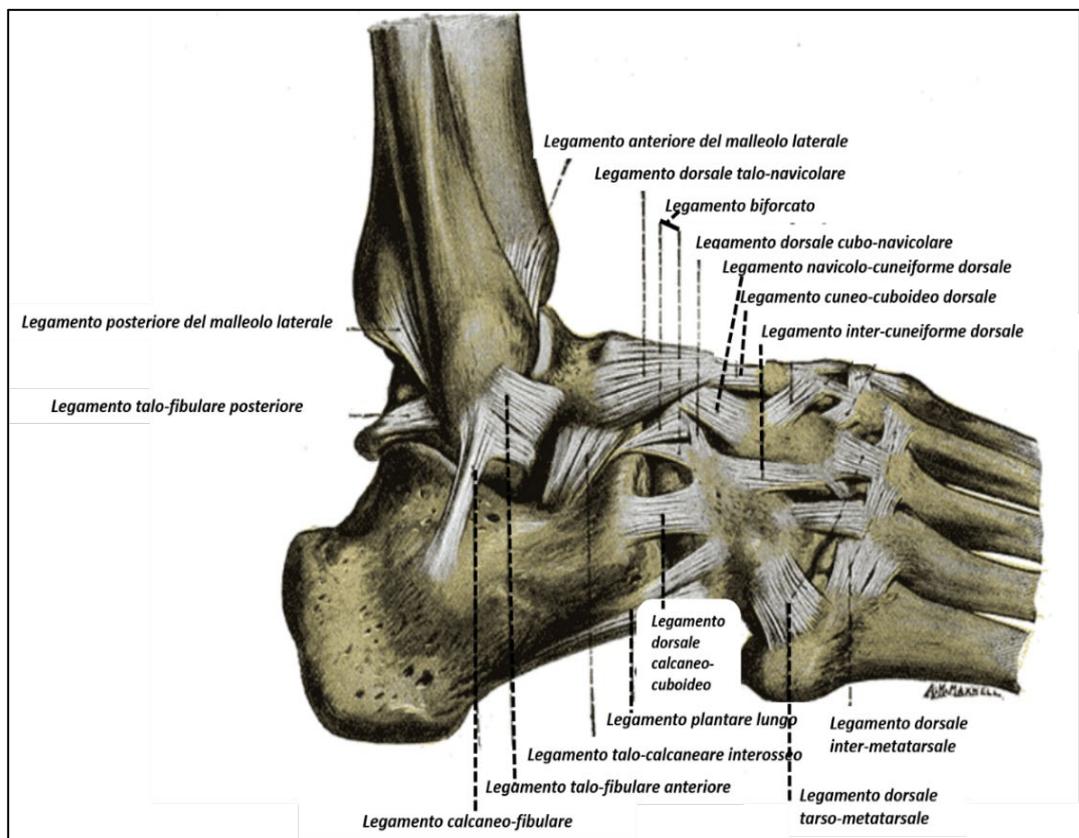


Figura 4. Vista laterale dei legamenti del complesso gamba-caviglia-piede [c]

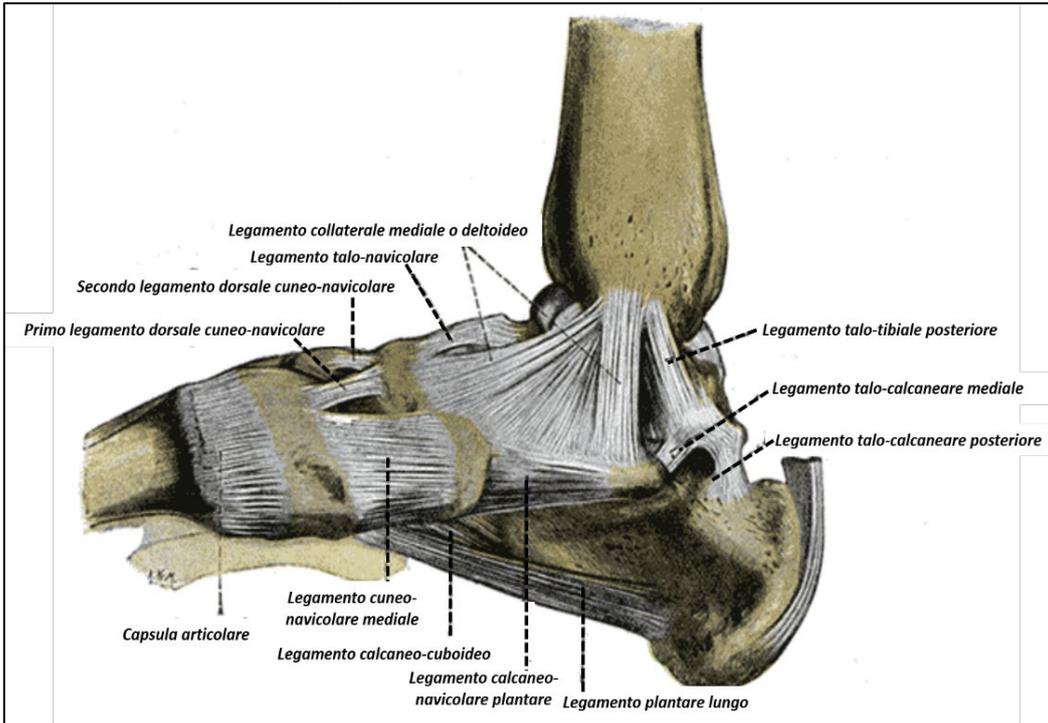


Figura 5. Vista mediale dei legamenti del complesso gamba-piede-caviglia [c]

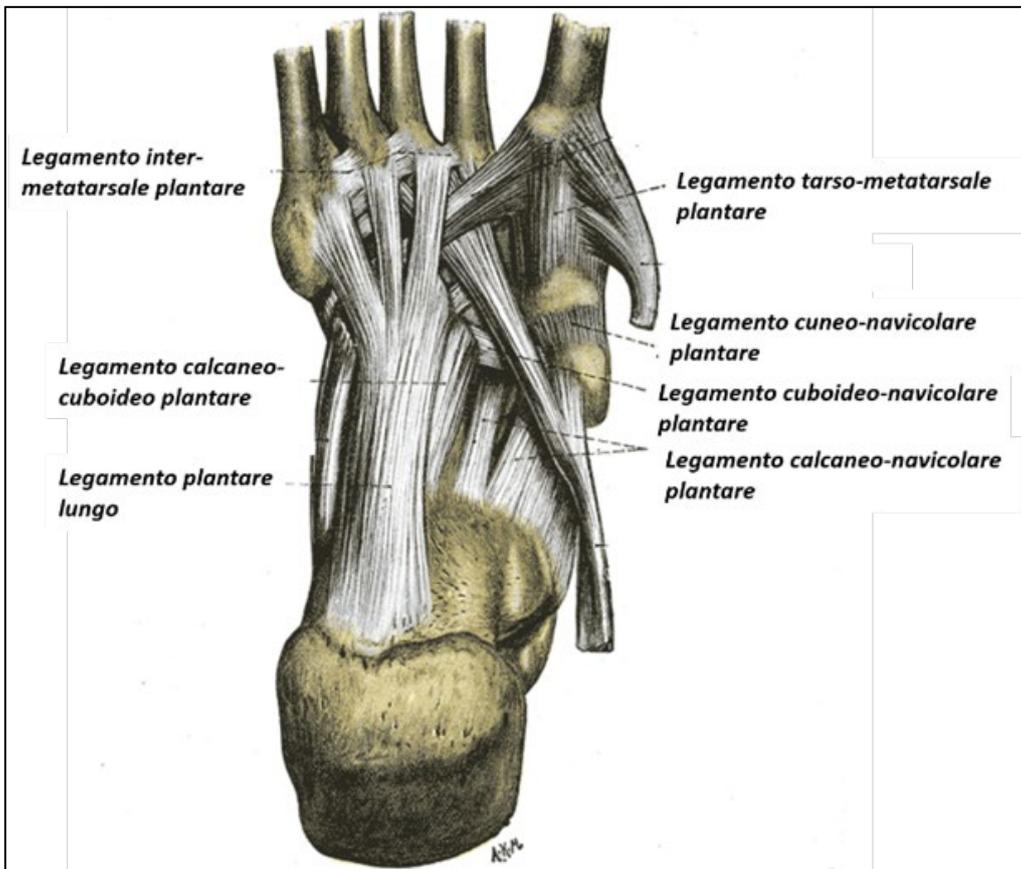


Figura 6. Vista plantare dei legamenti del piede [c]

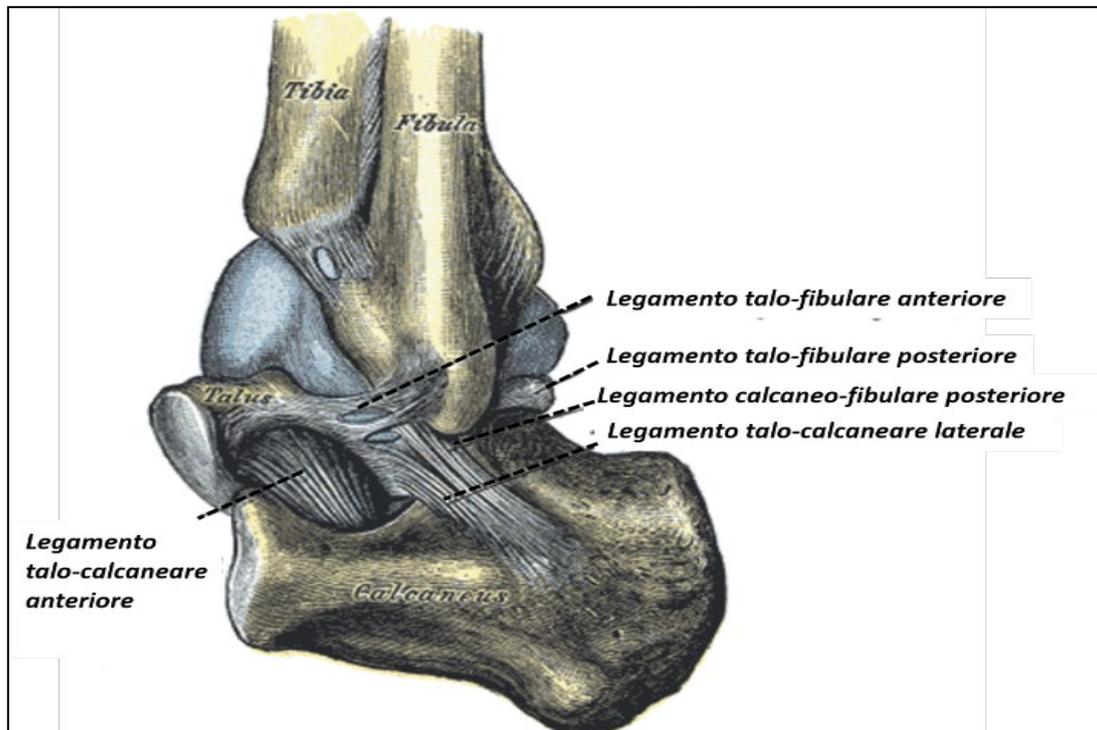


Figura 7. Vista posteriore dei legamenti del complesso gamba-caviglia-piede [c]

Il punto in cui le superfici ossee vengono a contatto è detto “articolazione”, e questa può consentire o meno il movimento relativo tra le parti a seconda che si parli di “sinartrosi”, “anfiartrosi” o “diartrosi”. Le sinartrosi sono articolazioni in cui il tessuto connettivo tra i segmenti ossei è di tipo fibroso, generalmente contenente un’alta quantità di collagene, e non consentono alcun movimento relativo tra le parti. Un esempio di sinartrosi sono le suture del cranio.

Le anfiartrosi utilizzano come tessuto connettivo sia la cartilagine ialina che quella fibrosa, spesso miste a collagene, e consentono movimenti piccola entità. Un esempio di anfiartrosi è la sinfisi pubica, la quale durante il parto permette piccoli movimenti per facilitare il passaggio del neonato.

Le diartrosi sono costituite da due superfici articolari rivestite da uno strato sottile di cartilagine ialina e tutta la struttura è racchiusa all’interno di due membrane: la più interna, detta “membrana sinoviale”, secreta il “liquido sinoviale”, responsabile della lubrificazione del movimento tra le ossa e la seconda, più esterna, forma la cosiddetta “capsula articolare”. Esempi di diartrosi sono l’articolazione della spalla e l’articolazione dell’anca. La struttura di una diartrosi è riportata in **Figura 8**.

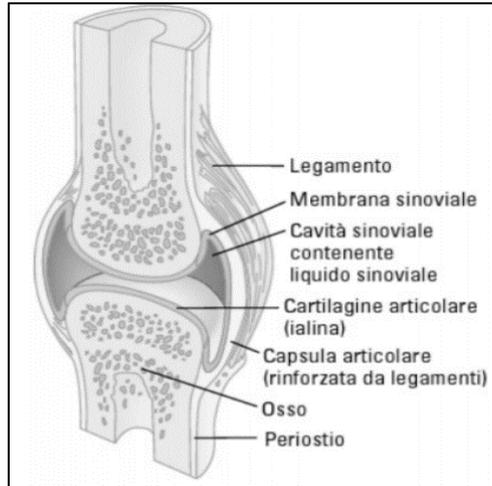
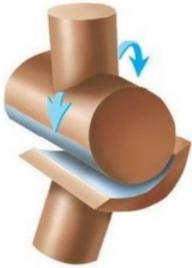
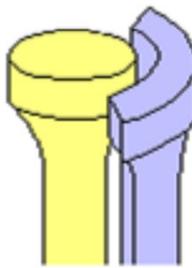
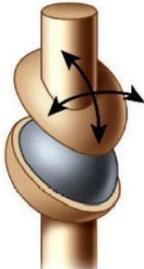
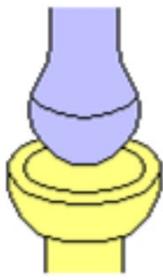


Figura 8. Struttura di una diartrosi [d]

 <p>Figura 9. Trocleoartrosi</p>	 <p>Figura 10. Trocoide</p>
 <p>Figura 11. Articolazione a sella</p>	 <p>Figura 12. Condiloartrosi</p>
 <p>Figura 13. Enartrosi</p>	 <p>Figura 14. Artrodia [e]</p>

Le diartrosi, in base al tipo di movimento che consentono, possono essere divise in:

- Trocleoartrosi: assimilabile ad un cilindro pieno alloggiato in un semi-cilindro concavo, come mostrato in **Figura 9**, consente il movimento di rotazione attorno ad un asse.
- Trocoide: assimilabile ad un capitello radiale alloggiato in un vano concavo cilindrico, come mostrato in **Figura 10**, consente anch'essa il movimento di rotazione attorno ad un asse.
- Articolazione a sella: assimilabile a due superfici entrambe con una parte concava ed una convessa, come mostrato in **Figura 11**, consente due movimenti angolari indipendenti.
- Condiloartrosi: assimilabile ad un corpo ovoidale alloggiato in una conca anch'essa ovoidale, come mostrato in **Figura 12** consente la rotazione in due direzioni.
- Enartrosi: assimilabile ad una sfera alloggiata in una conca anch'essa sferica, come mostrato in **Figura 13.**, consente due movimenti angolari ed una rotazione attorno al proprio asse.
- Artrodia: assimilabile a due superfici piane, come mostrato in **Figura 14**, consente lo scivolamento tra di esse.

Le articolazioni appartenenti al complesso gamba-caviglia-piede, rappresentate in **Figura 15**, sono:

- Articolazione tibio-peroniera: è una sinartrosi costituita dalle porzioni distali di tibia e perone.
- Articolazione tibio-tarsica: è una trocleoartrosi costituita dall'astragalo e dalla superficie concava formata dalle parti distali di tibia e perone.
- Articolazioni talo-calcaneare posteriore e anteriore: sono entrambe artrodie costituite rispettivamente da superficie posteriore di calcagno e astragalo e superficie anteriore di calcagno e astragalo.
- Articolazione talo-navicolare: è una enartrosi costituita dalle superfici di astragalo e osso navicolare.
- Articolazione calcaneo-cuboidea: è un'articolazione a sella costituita dalla parte distale del calcagno e dall'osso cuboide.
- Articolazione navicolo-cuboidea: è una sinartrosi costituita dalla superficie laterale dell'osso navicolare e dalla porzione posteriore dell'osso cuboide.

- Articolazione cuneo-cuboidea: è una sinartrosi costituita dalla superficie del terzo osso cuneiforme e dalla superficie dell'osso cuboide.
- Articolazione cuneo-navicolare: è un'artrodia costituita dall'osso navicolare e dalla superficie posteriore delle tre ossa cuneiformi.
- Articolazioni tarso-metatarsali: sono tutte artrodie e si instaurano tra le superfici di osso cuboide e ossa cuneiformi e quelle delle ossa metatarsali.
- Articolazioni metatarso-falangee: sono tutte condiloartrosi e si instaurano tra le ossa metatarsali e le falangi.
- Articolazioni interfalangee: sono tutte trocleoartrosi e si instaurano tra una falange e l'altra.

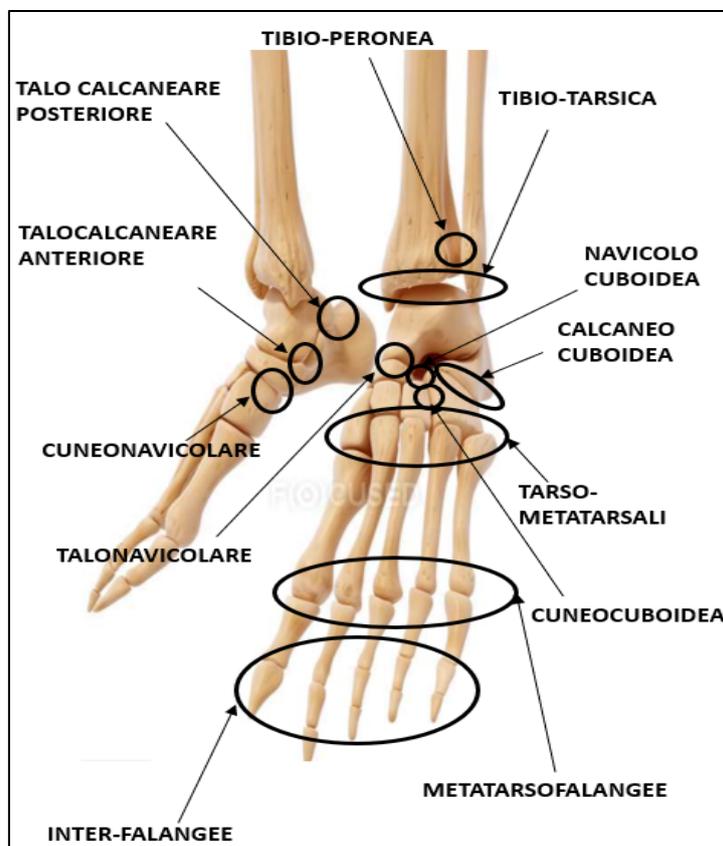


Figura 15. Articolazioni del complesso caviglia-piede [b]

1.2 I muscoli del complesso gamba-caviglia-piede

Le forze responsabili del movimento dei segmenti ossei all'interno del corpo umano vengono generate dai muscoli, la cui azione principale è quella di contrarsi a seguito di uno stimolo proveniente dal sistema nervoso.

Il tessuto muscolare può essere di due tipi:

- Liscio: i muscoli costituiti da questo tessuto sono muscoli involontari, come ad esempio la muscolatura dei vasi sanguigni.
- Striato: i muscoli costituiti da questo tessuto possono essere sia involontari che volontari.

I muscoli volontari di tessuto striato sono anche detti “muscoli scheletrici” in quanto collegati ai segmenti ossei, e la loro struttura è così organizzata: le cellule del muscolo, anche dette fibre, hanno forma filiforme e si estendono per tutta la sua lunghezza, sono ricoperte da una membrana chiamata “endomisio” e gruppi esse formano una capsula di tessuto detta “perimisio”, e il muscolo nel suo complesso è avvolto da una ulteriore capsula fibrosa chiamata “epimisio”. I tre avvolgimenti citati possono essere in continuità con il tessuto fibroso che collega il muscolo con l’osso, detto “tendine”, oppure possono proseguire fondendosi con il rivestimento fibroso di un altro muscolo. Il tessuto più esterno, che avvolge epimisio e tendine è chiamato “fascia”.

Le fibre muscolari presentano alcune differenze rispetto alle altre cellule del corpo umano, una di queste è il loro citoscheletro, al cui interno sono presenti filamenti citoscheletrici detti “miofibrille”, che si estendono per tutta la lunghezza della fibra. Si definisce come “sarcomero” un segmento di miofibrilla compreso tra due separatori noti come “dischi Z”: il sarcomero è l’unità contrattile base della cellula muscolare, e lo si può vedere rappresentato in **Figura 16**.

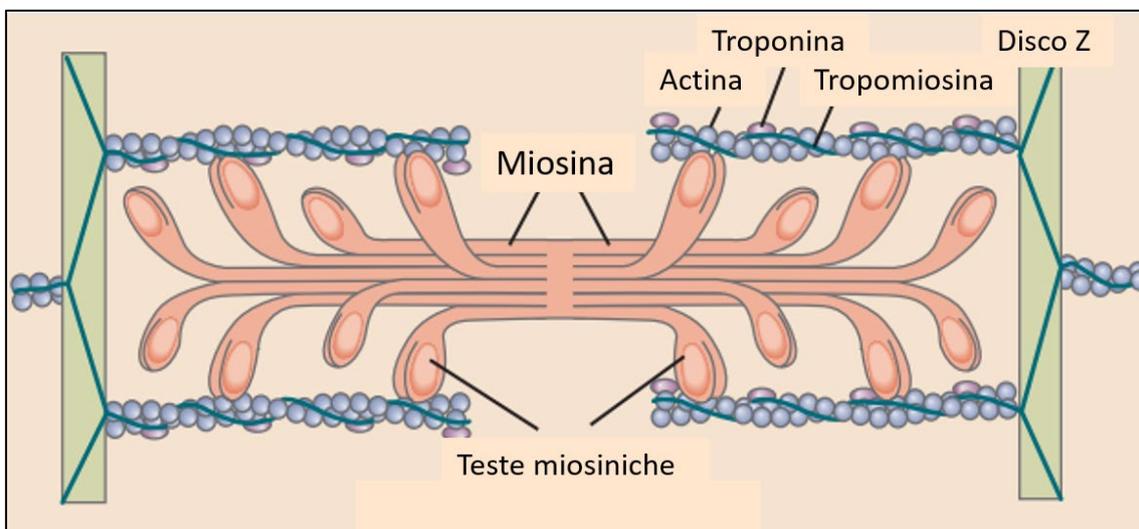


Figura 16. Struttura di un sarcomero (Neumann, 2013).

I sarcomeri, e in generale le miofibrille, sono costituiti da un insieme di fibre dette “miofilamenti” i quali possono essere spessi o sottili, e sono a loro volta costituiti principalmente da quattro diversi tipi di molecole proteiche: miosina, actina,

tropomiosina e troponina. In particolare, sempre facendo riferimento alla **Figura 16**, sono rappresentati: un tratto di miofilamento spesso (filamento di miosina al centro) e due tratti di miofilamenti sottili (filamenti di actina in alto ed in basso). I filamenti di miosina hanno lunghe code organizzate in un fascio spesso e delle teste che sporgono da esso, le quali sono chimicamente attratte dalle molecole di actina circostanti.

La contrazione di una fibra muscolare scheletrica avviene ad opera di un segnale elettrico proveniente da un “motoneurone”, ossia una cellula nervosa connessa alla suddetta fibra mediante un collegamento noto come “giunzione neuromuscolare”. In condizioni di riposo, la troponina blocca i siti di legame dell’actina, ma, nel momento in cui arriva un impulso da parte del motoneurone, i siti di legame vengono liberati e le teste miosiniche formano un collegamento temporaneo tra il miofilamento spesso ed il miofilamento sottile. A questo punto le teste miosiniche si piegano costringendo i filamenti sottili a scorrere verso il centro: questo modello di contrazione muscolare è detto “modello del filamento scorrevole”. In **Figura 17** è riportata una rappresentazione globale della struttura del muscolo scheletrico.

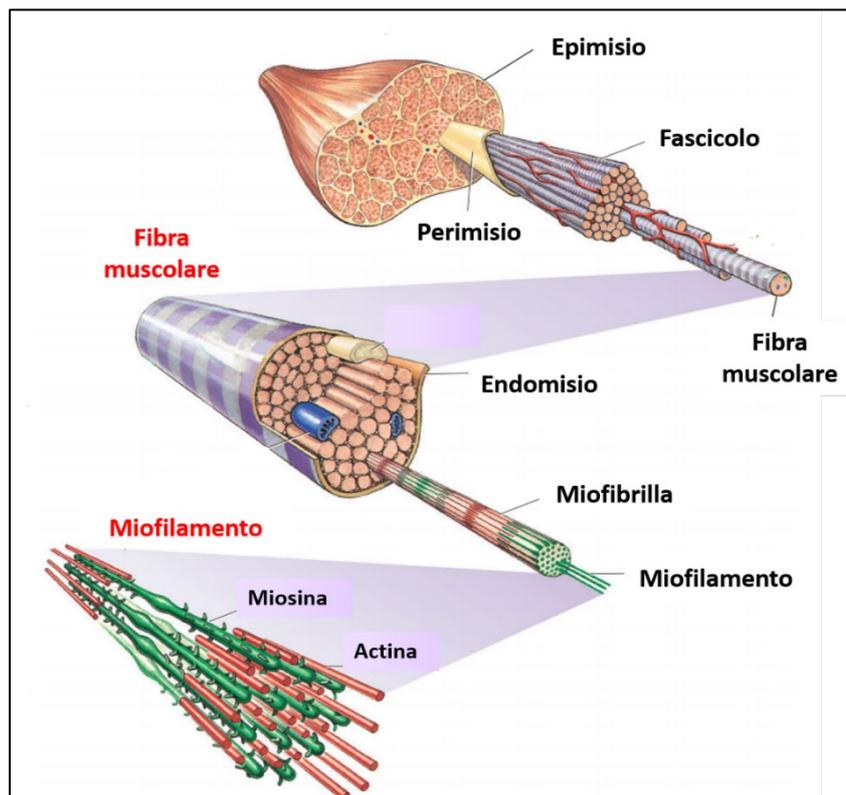


Figura 17. Struttura del muscolo scheletrico (Neumann, 2013)

Per quanto riguarda la muscolatura di tipo “liscio”, questa differisce da quella di tipo striato in quanto all’interno delle sue fibre i miofilamenti sono disposti in maniera diversa,

e ciò permette ai miofilamenti sottili di godere di una maggiore libertà di movimento, e quindi la possibilità di accorciare maggiormente le fibre muscolari durante la contrazione. I muscoli di questo tipo sono anch'essi deputati al movimento, ma è un movimento di tipo involontario, come ad esempio lo spostamento delle sostanze all'interno dei dotti o il cambiamento del diametro dei vasi sanguigni per regolare la pressione all'interno del corpo.

I muscoli scheletrici possono anche essere classificati in base al numero di articolazioni che ciascuno di essi è in grado di controllare: i muscoli monoarticolari sono responsabili del controllo di una sola articolazione, i biarticolari di due articolazioni e i pluriarticolari di più di due articolazioni. Una ulteriore divisione può essere fatta in base al ruolo che ciascun muscolo svolge: i muscoli agonisti assecondano il movimento, gli antagonisti si oppongono ad esso, i muscoli sinergici collaborano con gli antagonisti, i muscoli fissatori tengono fissa la base di appoggio mentre una articolazione è in movimento e i muscoli neutralizzatori bloccano l'azione di un altro muscolo su una articolazione.

E' importante sottolineare che: le forze che il muscolo trasferisce ai segmenti ossei sono la combinazione di meccanismi attivi e passivi, in particolare i meccanismi di tipo attivo rispondono ad un controllo volontario e si basano principalmente sull'interazione tra actina e miosina precedentemente descritta, mentre i meccanismi passivi sono dovuti alla rigidità del tessuto muscolare ed intervengono contrastando il normale allungamento del muscolo, al fine di garantire la stabilità dell'articolazione e la protezione da infortuni causati da eccessivo allungamento.

I muscoli responsabili dei movimenti del complesso piede-caviglia possono dividersi in due grandi gruppi, rappresentati nelle **Figure 18, 19, 20, 21 e 22**:

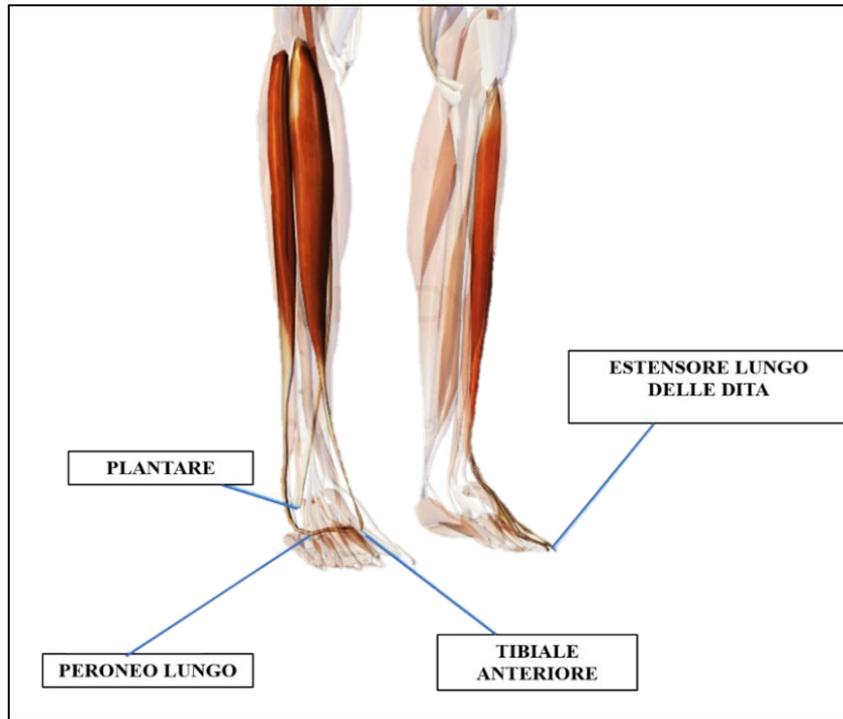


Figura 18. Esempi di muscoli estrinseci

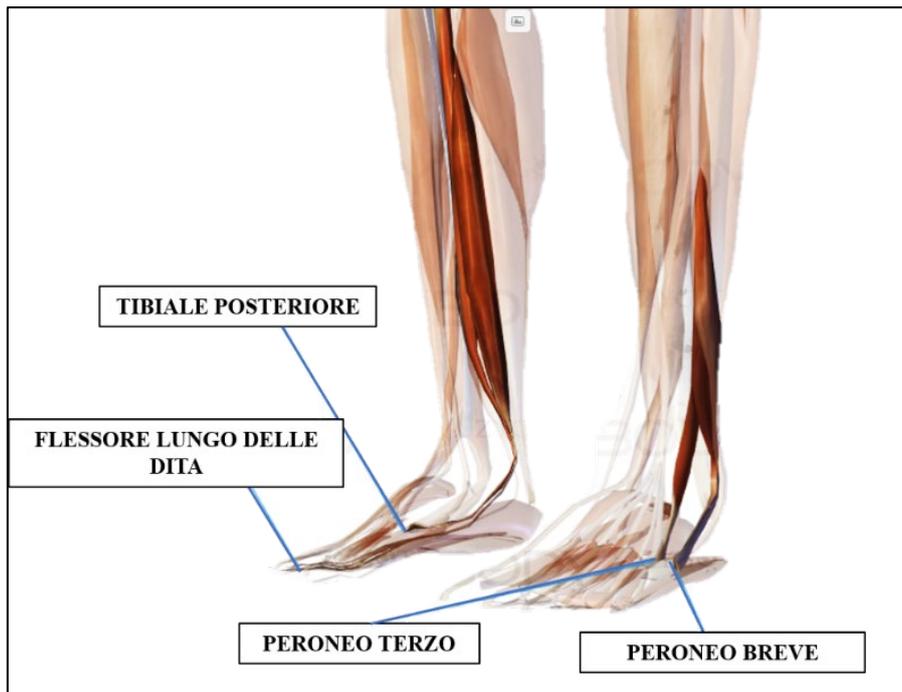


Figura 19. Esempi di muscoli estrinseci

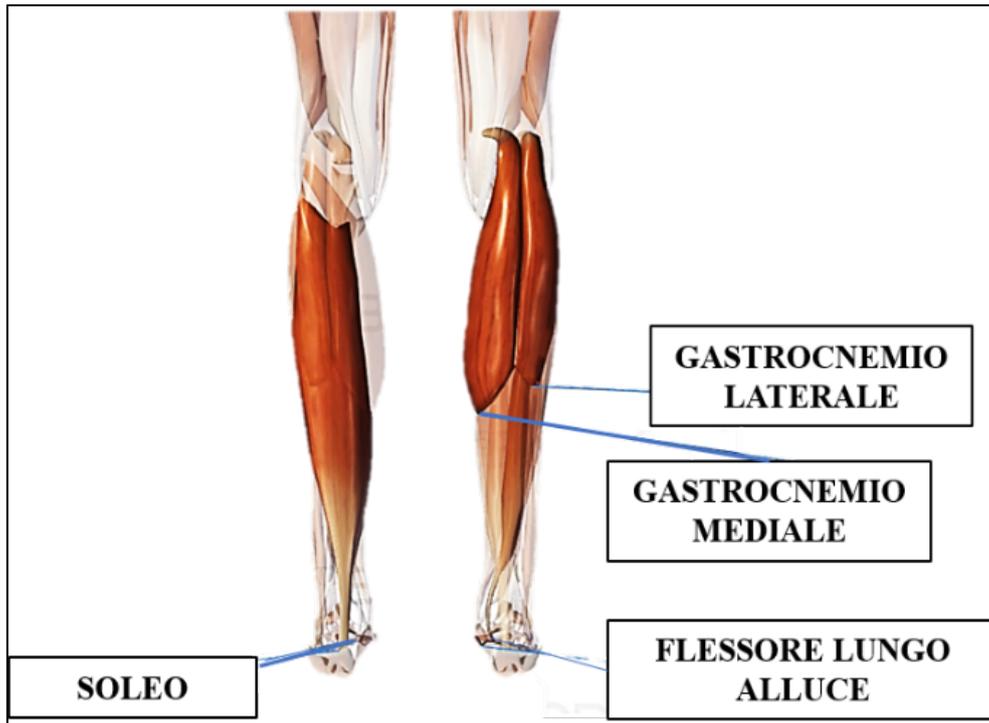


Figura 20. Esempi di muscoli estrinseci

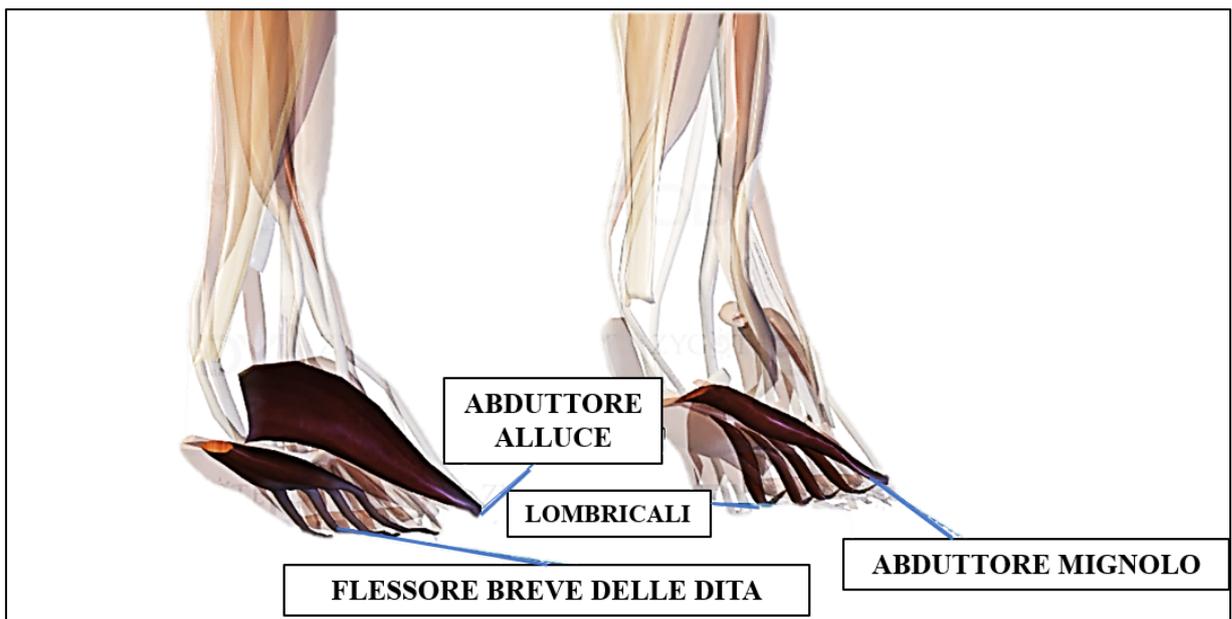


Figura 21. Esempi di muscoli estrinseci

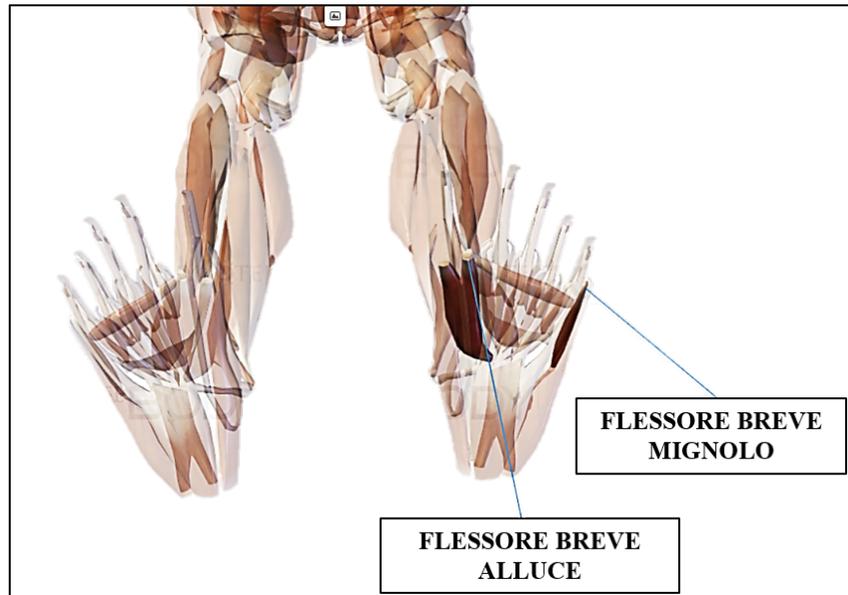


Figura 22. Esempi di muscoli estrinseci

1.3 I movimenti del complesso gamba-caviglia-piede

Ogni segmento del corpo umano durante il suo movimento è soggetto contemporaneamente a due tipi di forze: le forze di contatto tra le ossa all'interno dell'articolazione, dette "forze articolari" e le forze esercitate dai muscoli sulle ossa dell'articolazione, dette "forze muscolari". In base alla forma delle superfici delle ossa interne all'articolazione si possono generare diversi tipi di movimenti.

Nel caso del complesso piede-caviglia, questi sono sempre frutto del movimento combinato di più articolazioni e i più importanti, rappresentati nelle **Figure 23 e 24**, sono:

- Movimento di flessione plantare e flessione dorsale: si verifica nell'articolazione tibio-tarsica.
- Movimento di inversione ed eversione: si verifica nelle articolazioni calcaneo-cuboidea, talo-calcaneare posteriore ed anteriore e talo-navicolare.
- Movimento di flessione ed estensione delle falangi: si verifica nelle articolazioni interfalangee.

Come già detto, le forze responsabili dei movimenti sono esercitate dai muscoli, ed anche in questo caso ognuno di essi è responsabile di più movimenti, quindi è possibile raggrupparli in base a questi ultimi in:

- Muscoli plantiflessori: Gastrocnemio, Soleo e Plantare;
- Muscoli inversori: Tibiale posteriore, Flessore lungo delle dita e Flessore lungo dell'alluce;

- Muscoli eversori: Peroneo lungo e Peroneo breve;
- Muscoli dorsiflessori: Tibiale anteriore, Estensore lungo delle dita, Estensore lungo dell'alluce e Peroneo terzo;
- Muscoli responsabili del movimento delle dita dei piedi: Flessore lungo dell'alluce, Lombricali, Flessore breve del mignolo, Flessore breve dell'alluce, Flessore breve delle dita, Abduttore del mignolo e Abduttore dell'alluce.

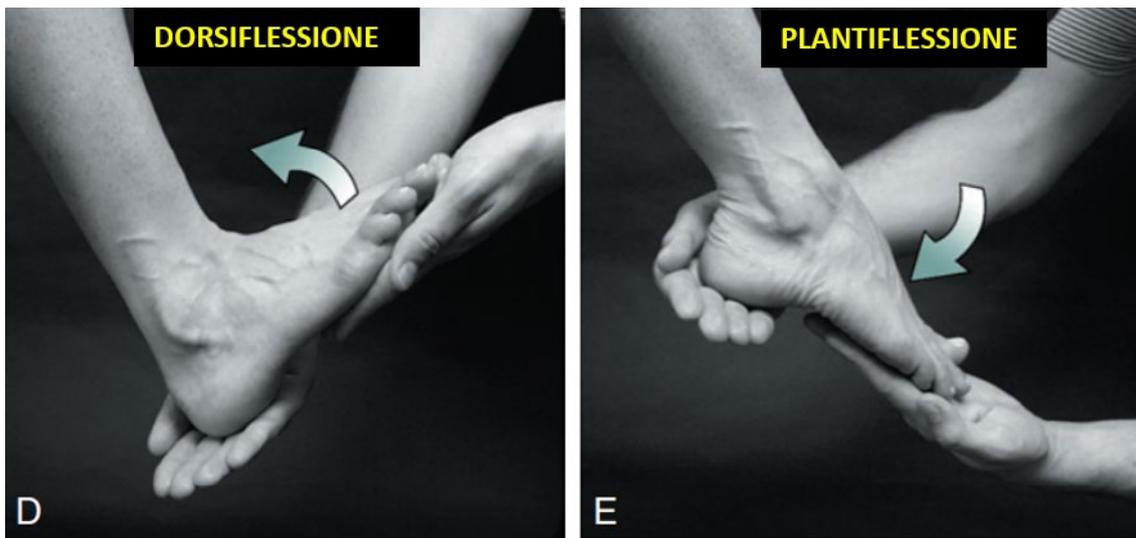


Figura 23. Movimento di dorsiflessione e plantiflessione (Neumann, 2013)

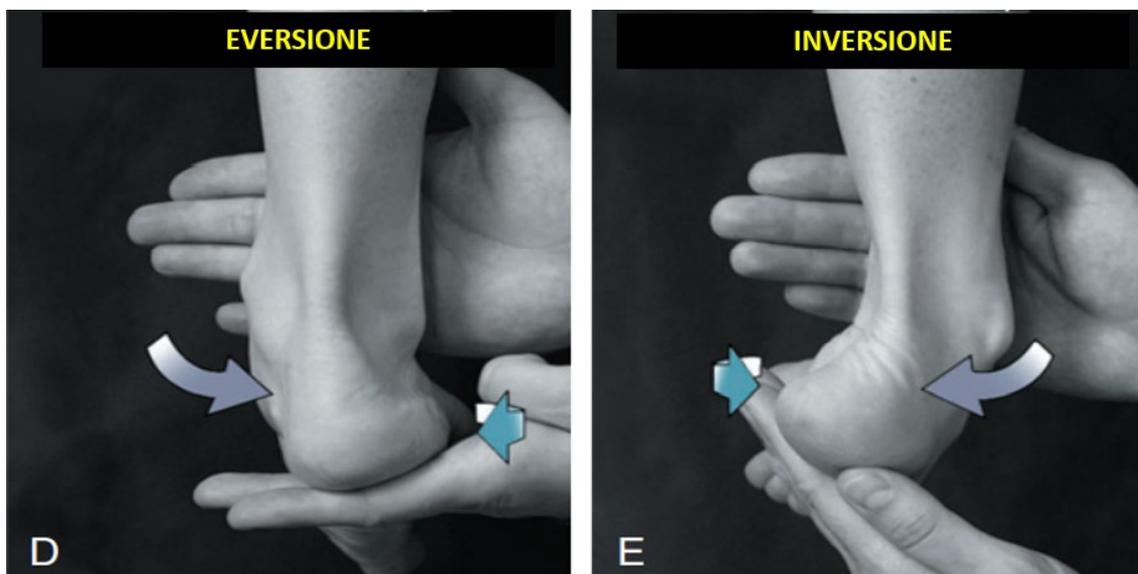


Figura 24. Movimento di eversione e inversione (Neumann, 2013)

Alcuni di questi muscoli, unitamente ai muscoli che si estendono per la rimanente lunghezza dell'arto, si attivano durante il cammino, ognuno in momenti diversi e con

durate di attivazione diverse. Un primo esempio è il Tibiale anteriore, che si attiva in due momenti: quando il calcagno tocca il terreno all'inizio del ciclo del passo e poi nuovamente durante la fase di pendolamento, ossia quando l'arto si trova in aria mentre il suo controlaterale è a contatto con il suolo. Al contrario, il Soleo ed il Gastrocnemio si attivano durante la fase di appoggio, ossia quando l'arto è completamente a contatto con il terreno, mentre l'Estensore lungo delle dita e l'Estensore lungo dell'alluce si attivano solamente al contatto del calcagno con il suolo e poi al momento del distacco del piede da quest'ultimo. Anche i muscoli intrinseci prendono parte al cammino, attivandosi da metà della fase di appoggio fino al distacco del piede dal terreno (Neumann, 2013).

Capitolo 2

Le conseguenze dell'ictus sul complesso piede caviglia

Tutti i movimenti eseguiti dal corpo umano sono la diretta conseguenza di un segnale che parte dal cervello e raggiunge i muscoli, i quali esercitano sui segmenti ossei le forze necessarie a metterli in movimento. L'ictus è una patologia che colpisce le arterie del sistema cerebrale, bloccando il passaggio del sangue, e provocando la morte dei neuroni che si trovano nelle zone non perfuse a valle del blocco. Se i neuroni in questione sono anche quelli responsabili del trasporto del segnale destinato ad innescare il movimento, questo provoca un'alterazione dell'attività muscolare nota come "spasticità", che consiste in una eccessiva rigidità del muscolo ed una attivazione non più volontaria ma incontrollata di esso. Nel caso del complesso gamba-caviglia-piede, una delle conseguenze principali della spasticità è l'alterazione del cammino. Una possibile soluzione all'attività anormale dei muscoli è l'utilizzo della tossina botulinica, la quale ne inibisce temporaneamente l'attivazione.

2.1 L'ictus

Il sistema nervoso centrale si compone di cervello e midollo spinale (**Figura 25**) e le sue unità di base, chiamate neuroni, possono essere divise in [f]: motoneuroni, neuroni di senso e neuroni sensitivi somatici. Di questi, i neuroni che intervengono nella catena di segnali che porta alla contrazione muscolare sono i motoneuroni, la cui struttura, come mostrato in **Figura 26**, è costituita da: un corpo cellulare detto "soma", delle ramificazioni che partono da esso chiamate "dendriti", ed infine un braccio detto "assone".

La contrazione di un muscolo avviene nel momento in cui le sue fibre vengono raggiunte dal segnale inviato dal cervello, ossia un potenziale elettrico che viaggia lungo l'assone dei singoli neuroni con la possibilità di muoversi da uno all'altro mediante una struttura di collegamento chiamata "sinapsi", che fa da ponte tra l'assone di un neurone e il soma o le dendriti del neurone vicino.

I motoneuroni possono a loro volta essere divisi in:

- Primo motoneurone: il soma della cellula si trova nella corteccia cerebrale ed il suo assone discende verso il midollo spinale.
- Secondo motoneurone: il soma della cellula si trova nel midollo spinale ed il suo assone si prolunga fino a raggiungere i muscoli.

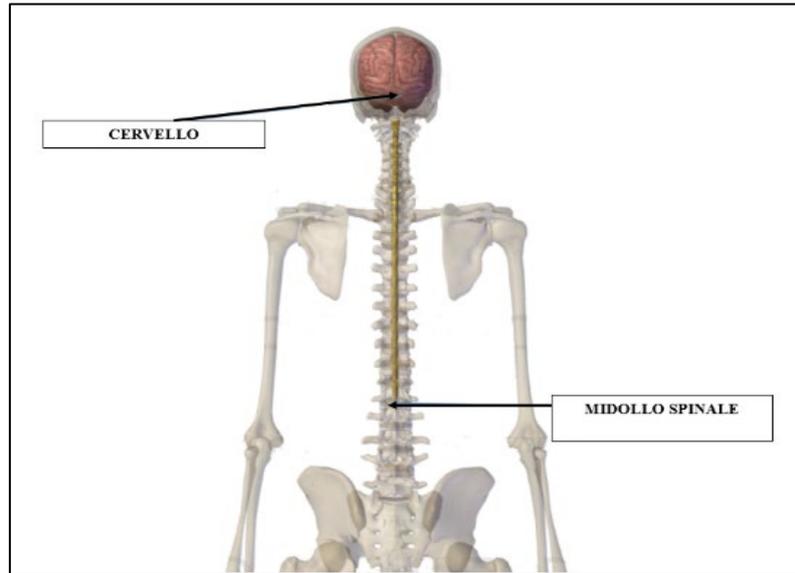


Figura 25. Sistema nervoso centrale

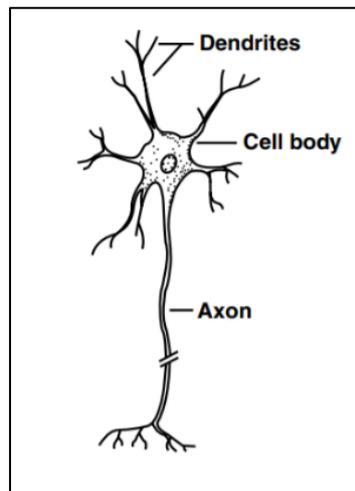


Figura 26. Struttura del motoneurone (Northrop, 2000)

Il segnale originatosi nel cervello riesce quindi a scendere nel midollo spinale viaggiando attraverso il primo e poi il secondo motoneurone, fino a raggiungere il punto in cui le sinapsi del secondo motoneurone si connettono alle fibre motorie del muscolo;

quest'ultimo punto è detto “giunzione neuromuscolare”. Il percorso del segnale dalla corteccia cerebrale fino al muscolo è mostrato in **Figura 27**.

Il corpo umano ospita un gran numero di vasi sanguigni, che possono essere classificati in base al loro diametro in: arterie maggiori, arterie di medio calibro, piccole arterie e capillari. La circolazione cerebrale può essere divisa in (Benamer, 2011):

- Circolazione anteriore, mostrata in **Figura 28**, formata da: arterie carotidee interne e le loro diramazioni, arterie cerebrali medie e arterie cerebrali anteriori.
- Circolazione posteriore, mostrata in **Figura 29**, formata da: due arterie vertebrali che si uniscono a formare l'arteria basilare, la quale si biforca in due arterie cerebrali posteriori.

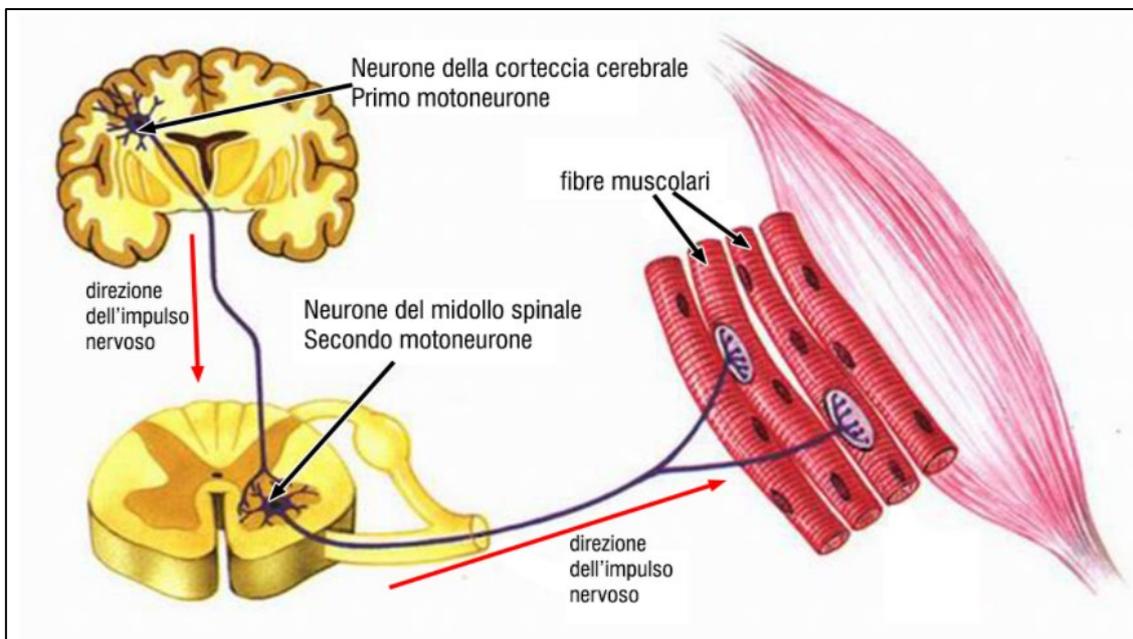


Figura 27. Percorso del segnale dalla corteccia cerebrale fino al muscolo [g].

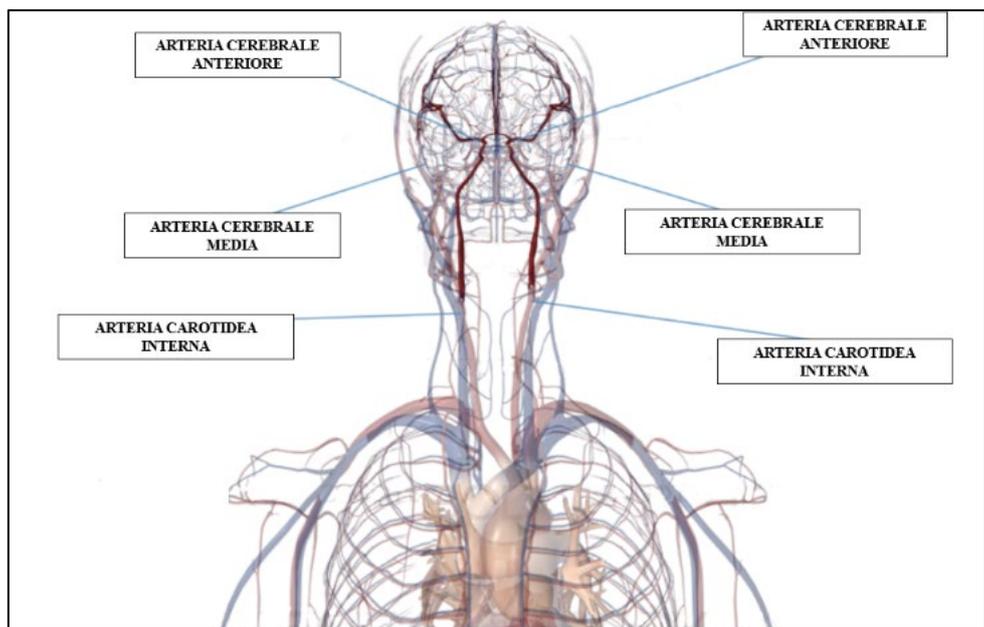


Figura 28. Circolazione anteriore

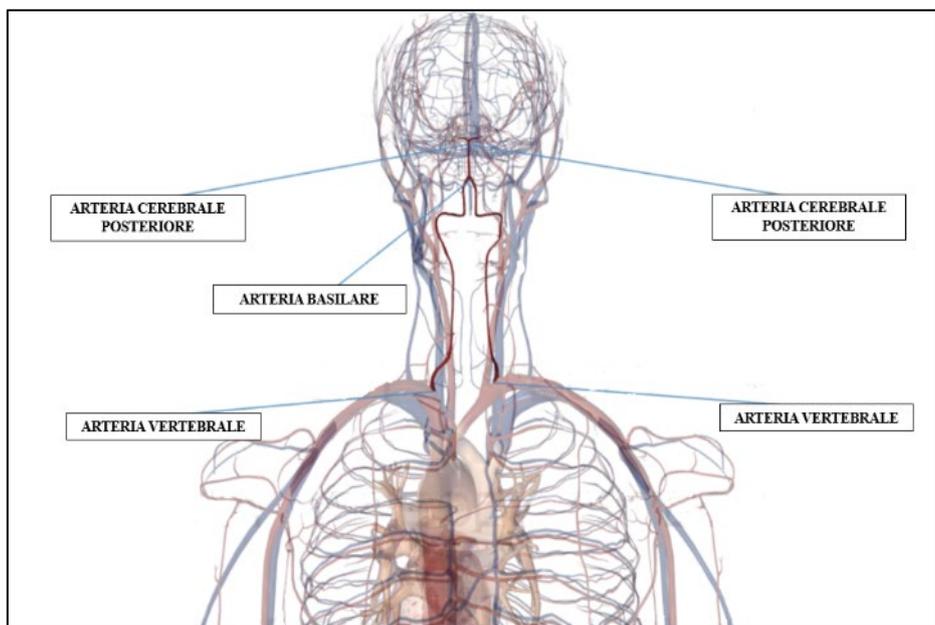


Figura 29. Circolazione Posteriore

Tra le patologie che più frequentemente colpiscono le arterie è presente l'aterosclerosi (AS), la quale colpisce maggiormente l'aorta, le coronarie e le arterie del sistema cerebrale. L'AS è causata dalla formazione di una placca sulla parete di un vaso sanguigno che, con il passare del tempo, tende ad aumentare di volume, e questo può portare, nel caso delle arterie del sistema cerebrale, a:

- Ictus ischemico: la placca aumenta di volume a tal punto da non permettere più il passaggio di sangue.

- Ictus emorragico: l'aumento di volume della placca provoca uno sfiancamento nella parete dell'arteria predisponendola ad emorragia.

Entrambe queste situazioni portano alla mancata perfusione delle zone a valle del sito compromesso e quindi, nel caso della circolazione cerebrale, alla morte dei neuroni presenti in quelle zone.

L'ictus è una delle principali cause di disabilità motoria (Feigin et al., 2003) in quanto è noto che, nelle prime settimane a seguito dell'evento, il paziente è spesso soggetto ad una cosiddetta "spasticità muscolare", ossia un aumento della rigidità del tessuto muscolare unito a livelli abnormali di attivazione volontaria dei muscoli. Come detto nel precedente capitolo, le forze generate dai muscoli sono la combinazione di meccanismi attivi (volontari) e passivi (involontari), la spasticità comporta una difficoltà nei movimenti passivi, in quanto l'eccessiva rigidità del muscolo si oppone ad essi, ed una difficoltà nel controllare i movimenti attivi, in quanto il muscolo si attiva indipendentemente dalla volontà del paziente (Neumann, 2013).

La spasticità è causata dal mancato apporto di sangue al primo motoneurone e colpisce generalmente la parte controlaterale del corpo rispetto al lato del cervello in cui si è verificato l'ictus, in particolare si parla di (Nowak and Hermsdörfer, 2009):

- Emiparesi o emiplegia, quando l'intera metà controlaterale è affetta da spasticità.
- Monoparesi o monoplegia, quando un solo arto appartenente alla metà controlaterale è affetto da spasticità.

Ci sono diverse valutazioni di tipo clinico a cui i pazienti che presentano spasticità a seguito di ictus vengono sottoposti (Alingh et al., 2020); Hara et al., 2019; Datta Gupta et al., 2019; Gupta et al., 2018; Cofré Lizama et al., 2019), le più comuni sono riportate in **Tabella 1**.

Denominazione	Tipo di valutazione
Modified Ashworth scale o MAS	Valutazione della resistenza del muscolo ad un allungamento passivo eseguito ad un'unica velocità
Tardieu scale	Valutazione della risposta del muscolo ad uno allungamento passivo eseguito a velocità differenti
Timed up and go test o TUG	Misura del livello di mobilità
Berg balance scale o BBS	Valutazione dell'equilibrio in diverse condizioni
Fugl-Meyer Assessment o FMA	Valutazione della compromissione sensomotoria

ABILOCO scale	Misura della capacità di locomozione
MRC scale	Valutazione della forza muscolare
Modified Rankin Scale o mRS	Misura del grado di disabilità
Motricity index o MI	Valutazione delle abilità motorie di un singolo arto

Tabella 1 Valutazioni cliniche più comuni per pazienti affetti da spasticità post ictus. (Alingh et al., 2020; Hara et al., 2019; Datta Gupta et al., 2019; Gupta et al., 2018; Cofré Lizama et al., 2019)

La Modified Ashworth scale e la Tardieu scale vengono utilizzate per assegnare un livello di gravità alla spasticità del paziente: la prima è utile per avere una misura del tono muscolare, tuttavia dal momento che la spasticità è un fenomeno in parte dipendente dalla velocità, è necessario valutare anche l'abilità del paziente nel controllare la velocità dei movimenti di tipo passivo (Micieli and Amantea, 2015), e questo viene fatto utilizzando la Tardieu scale.

Per quanto riguarda invece le valutazioni di tipo biomeccanico, nel caso di spasticità dell'arto inferiore la maggior parte di esse viene effettuata su dati acquisiti durante il cammino, come ad esempio: i parametri spazio-temporali, la cinematica e la dinamica dell'arto patologico e l'EMG dei muscoli compromessi. Nel caso specifico di spasticità di uno o più muscoli appartenenti al complesso gamba-caviglia-piede, possono essere valutati specificamente per la caviglia anche: momento di plantiflessione, potenza sviluppata e lavoro. Ulteriori valutazioni fatte per mezzo dei parametri ottenuti dall'osservazione del cammino possono essere il controllo dell'equilibrio e l'asimmetria del cammino.

La spasticità post-ictus è causa di difficoltà in molti aspetti della vita del paziente, e, nel caso di alcuni pattern che si verificano più frequentemente, questi disagi sono stati identificati e riportati (Micieli and Amantea, 2015). Nel caso dei muscoli dell'arto inferiore i pattern più comuni sono: la spasticità dei muscoli adduttori, che causa difficoltà nel vestirsi e nel mantenimento dell'igiene personale, la spasticità dei muscoli flessori o estensori del ginocchio che causano difficoltà nel cammino, nel mantenimento dell'equilibrio e nel sedersi, la spasticità del muscolo estensore dell'alluce che causa difficoltà nell'indossare le scarpe e infine, la spasticità dei muscoli plantiflessori che causa difficoltà nell'appoggio completo del piede durante il cammino.

2.2 La spasticità del complesso gamba-caviglia-piede

Come detto in precedenza, i muscoli del complesso gamba-caviglia-piede possono essere suddivisi in quattro gruppi in base ai movimenti di cui sono responsabili: inversori, eversori, plantiflessori e dorsiflessori.

In presenza di spasticità di uno o più di essi possono presentarsi quattro pattern (Li, 2020):

- Piede varo: condizione per la quale il piede è tenuto costantemente in inversione.
- Piede equino: condizione per la quale la caviglia ed il piede sono costantemente in posizione plantiflessa.
- Alluce striatale: condizione di iper-estensione dell'alluce.
- Piede equinovaro: condizione per la quale il piede è tenuto contemporaneamente in inversione e plantiflessione, come mostrato in **Figura 30**.

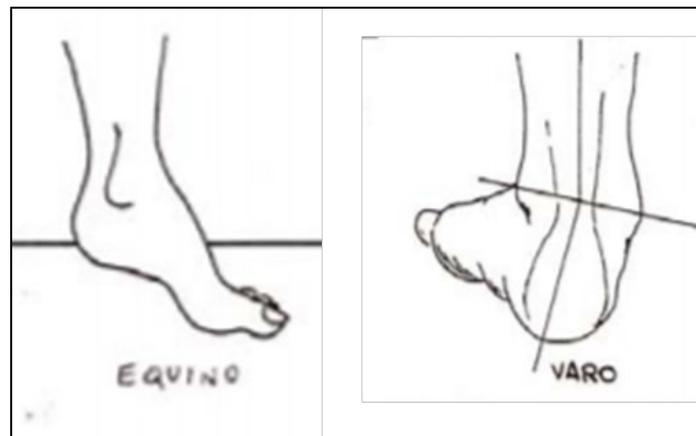


Figura 30. Piede equino e piede varo [h]

La deformità del piede equinovaro si origina principalmente a causa del cambiamento dei tessuti che circondano i muscoli del polpaccio (in particolare plantiflessori ed inversori), i quali, essendo soggetti a spasticità, tendono a rimanere accorciati per lunghi periodi di tempo. A questo si associa anche una debolezza dei muscoli dorsiflessori della caviglia, del peroneo breve, del peroneo lungo, del gastrocnemio, del soleo e del tibiale anteriore (Deltombe et al., 2017).

Per quanto riguarda le modificazioni che il complesso gamba-caviglia-piede subisce, queste si osservano principalmente per calcagno, astragalo ed avampiede (**Figura 31** Figura **32**), in particolare (Redmond, 2015):

- rotazione del calcagno;
- equinismo di astragalo e calcagno;
- rotazione dell'asse del collo dell'astragalo;

- adduzione, equinismo e supinazione dell'avampiede;

Per i pazienti sopravvissuti ad ictus che presentano spasticità di uno o più muscoli coinvolti nel cammino, si possono osservare delle modificazioni al normale ciclo del passo.

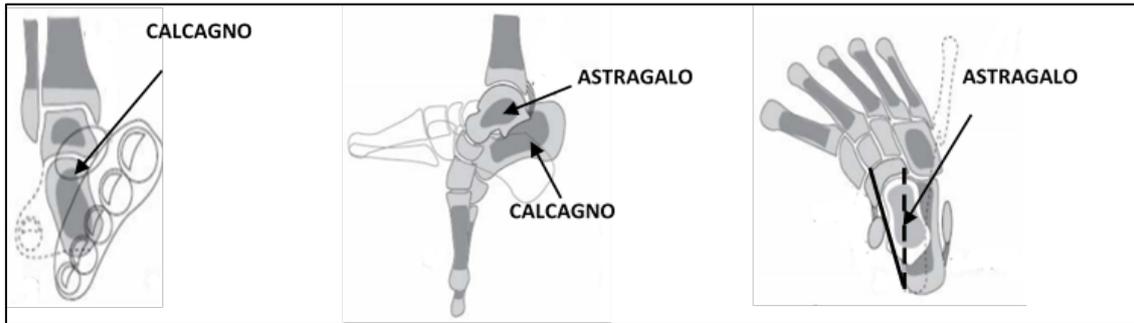


Figura 31. Partendo da sinistra: rotazione del calcagno, equinismo di calcagno ed astragalo e rotazione dell'asse del collo dell'astragalo [h].

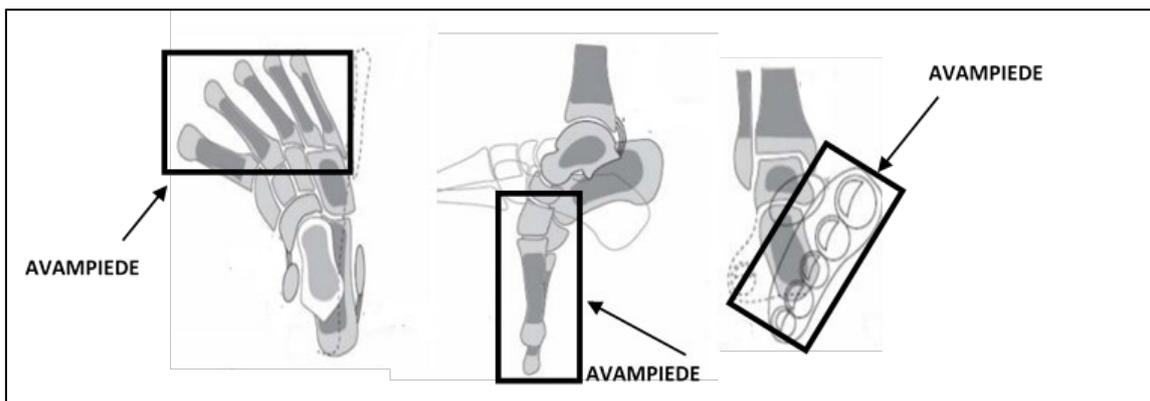


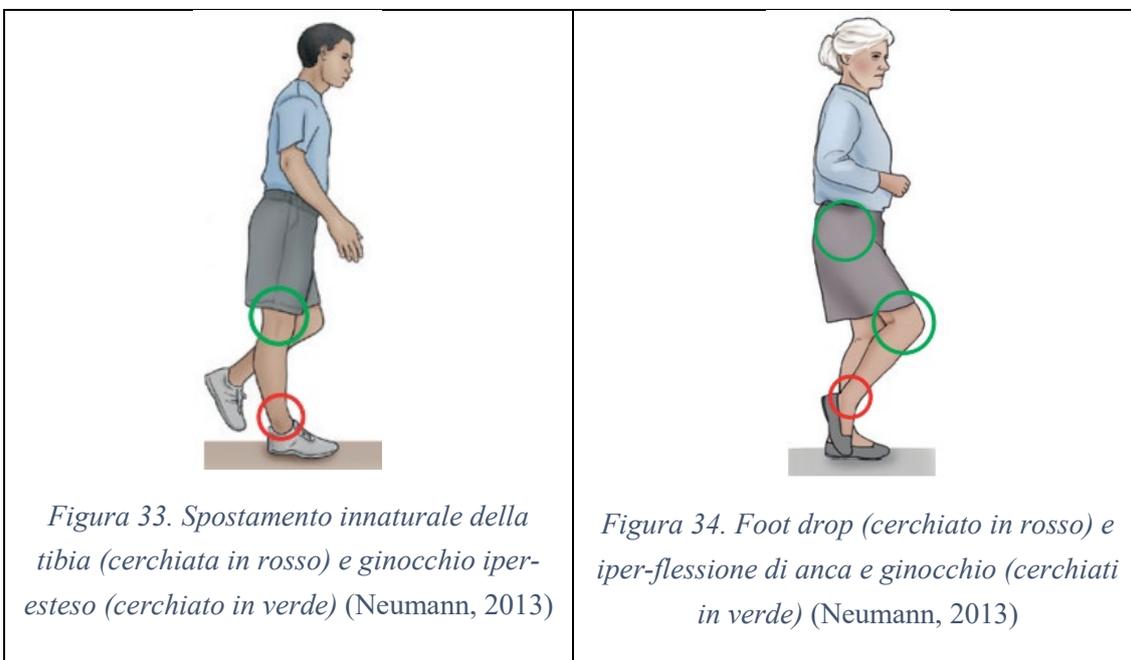
Figura 32. Adduzione, equinismo e supinazione dell'avampiede [h].

Nel caso di piede equino ad esempio, il paziente tende ad iniziare la deambulazione poggiando per primo l'avampiede piuttosto che il calcagno, e in generale a non appoggiare mai quest'ultimo durante tutto il ciclo del passo, anche quando fisiologicamente tutto il piede dovrebbe essere a contatto col terreno. Sempre nel caso di piede equino può verificarsi anche uno spostamento della tibia verso dietro, il quale causa una iper-estensione del ginocchio (**Figura 33**), questo dovuto al fatto che il paziente forza il calcagno a venire a contatto con il suolo (Neumann, 2013).

Per il piede equinovaro invece, può verificarsi il cosiddetto “drop foot”, ossia l'incapacità di tenere il piede sollevato durante le fasi del cammino che lo richiedono, e questo porta il paziente a cercare di compensare flettendo in maniera esagerata sia il ginocchio che l'anca, come mostrato in **Figura 34**. Sempre per piede equinovaro, si nota inoltre una

generale mancanza di propulsione durante il cammino ed una tendenza ad appoggiare sempre e solo la parte laterale del piede al suolo (Neumann, 2013).

Ulteriori deviazioni del cammino possono essere provocate anche da problematiche che affliggono articolazioni al di fuori del complesso gamba-caviglia-piede, un esempio è il ginocchio, che può essere soggetto ad una rapida estensione a seguito del contatto del calcagno con il suolo, oppure rimanere totalmente rigido mentre il piede è completamente a contatto col terreno, o ancora, trovare difficoltà ad estendersi durante la fase di pendolamento (quando l'arto si muove in aria preparandosi ad appoggiarsi al suolo mentre il suo controlaterale ha il piede completamente a contatto con il terreno) (Neumann, 2013).



2.3 La tossina botulinica

Come detto in precedenza, la sinapsi è la struttura che funge da ponte tra la ramificazione dell'assone di un neurone (detto "neurone pre-sinaptico") e il soma o la dendrite di un altro neurone (detto "neurone post-sinaptico").

La sinapsi è costituita da un certo numero di vescicole contenenti una sostanza chiamata "neurotrasmettitore", come mostrato in **Figura 35**. Nel momento in cui il potenziale elettrico finisce la sua corsa sull'assone del neurone pre-sinaptico, le vescicole di quest'ultimo si fondono con la membrana liberando il neurotrasmettitore, il quale raggiunge il neurone post sinaptico innescando la depolarizzazione della sua membrana e quindi la ripartenza del potenziale elettrico.

Il ruolo delle sinapsi è fondamentale per il movimento, in quanto garantisce che il potenziale elettrico partito dal cervello possa essere trasmesso dal primo motoneurone al secondo e poi, una volta giunto alla fine della corsa, tramite la sinapsi detta “giunzione neuromuscolare”, dal secondo motoneurone al muscolo, innescandone la contrazione.

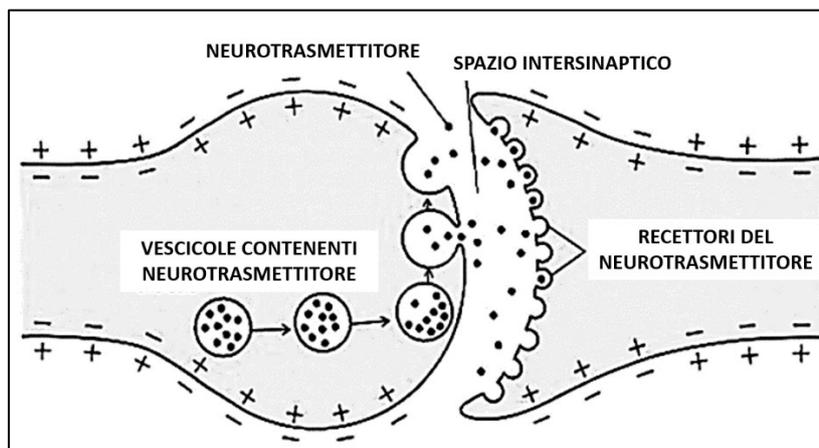


Figura 35. Struttura di una sinapsi [i].

Come già detto, per i pazienti affetti da spasticità post ictus, questo processo diventa difficilmente controllabile in quanto la mancanza di stimoli inibitori dà origine a delle contrazioni involontarie.

Un possibile rimedio temporaneo alle contrazioni involontarie è costituito dall’utilizzo della “tossina botulinica”, una proteina prodotta dal batterio *Clostridium botulinum* che iniettata all’interno di un muscolo ne inibisce la contrazione, provocando una cosiddetta “paralisi flaccida” (Micieli and Amantea, 2015).

Ad oggi sono stati scoperti sette sierotipi di tossina botulinica, denominati con lettere dalla A alla G, e di questi il tipo A è risultato il più potente.

L’inibizione della contrazione del muscolo mediante l’utilizzo di tossina botulinica avviene mediante diversi step, primo tra tutti l’iniezione della tossina nel muscolo affetto da spasticità. La tossina botulinica di tipo A ha un dominio carbossilico terminale in grado di riconoscere delle specifiche molecole che si trovano sulle terminazioni del motoneurone, quindi una volta iniettata essa andrà a legarsi con queste molecole. Il legame tra la tossina e le molecole presenti sulla terminazione del motoneurone impedirà la fusione tra la membrana del motoneurone stesso e le vescicole che trasportano il neurotrasmettore, inibendo così il rilascio del neurotrasmettore nella giunzione neuromuscolare e fermando quindi la corsa del potenziale elettrico, come mostrato in **Figura 36**.

Esistono diverse preparazioni farmaceutiche di tossina botulinica di tipo A, che in genere includono anche altre sostanze allo scopo di stabilizzare il farmaco e facilitare la somministrazione per iniezione intramuscolare.

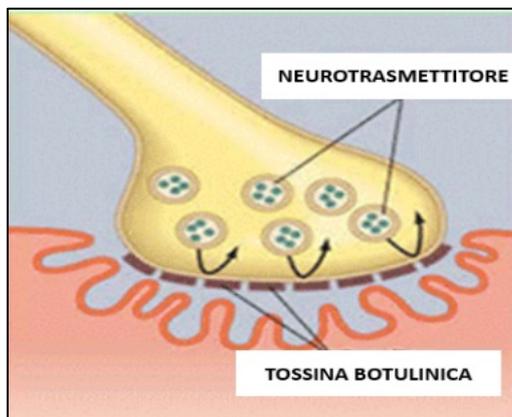


Figura 36. Azione della tossina botulinica [j].

Per quanto riguarda il numero e la posizione dei siti di iniezione, il dosaggio e il numero di iniezioni da eseguire nel corso del tempo, questi vengono valutati caso per caso da un medico.

L'effetto della tossina botulinica non è permanente, quindi si necessita di più iniezioni, e l'efficacia tra una iniezione e l'altra non è costante, ma servono all'incirca dalle quattro alle sei settimane affinché raggiunga il suo massimo, per poi decrescere nuovamente, come mostrato in **Figura 37** (Jacinto et al., 2020).

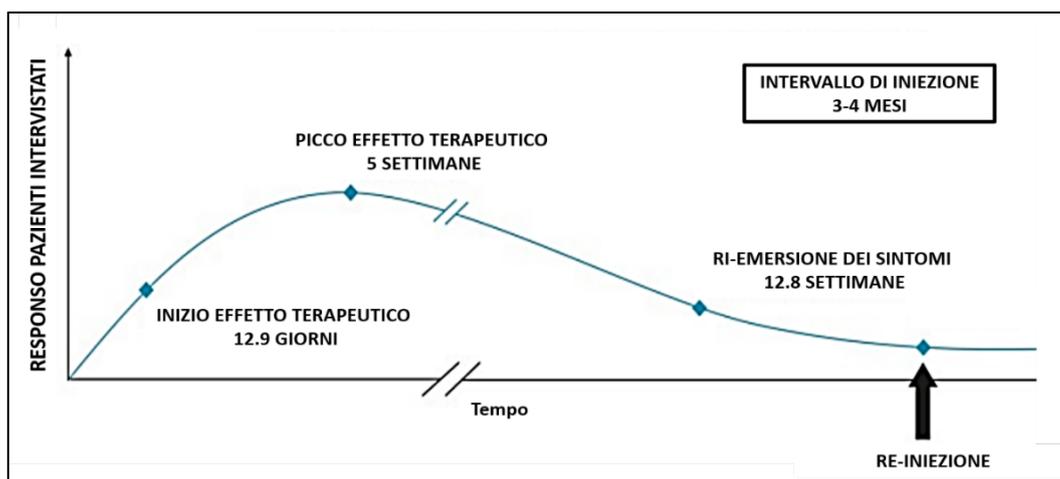


Figura 37. Andamento dell'efficacia della tossina botulinica tra una iniezione e la successiva (Jacinto et al., 2020).

Le valutazioni più comunemente usate per monitorare i miglioramenti dovuti alla tossina botulinica sono (Hara et al., 2019): l'attribuzione di un livello di gravità alla condizione

di spasticità (usualmente valutata mediante scale cliniche), la valutazione delle abilità nel cammino, delle funzioni fisiche e muscolari e delle funzioni motorie (per le quali oltre alle scale cliniche ci si serve anche dell'analisi cinematica, dinamica e dei parametri spazio-temporali), ed infine la necessità di assistenza e la qualità della vita (valutate mediante questionari).

È noto (Micieli and Amantea, 2015) che l'iniezione di tossina botulinica è estremamente sicura per il paziente (salvo casi in cui viene sconsigliata come gravidanza, allattamento, malattie neuromuscolari e paziente sotto antibiotici), in quanto raramente si manifestano effetti collaterali. È possibile, anche se raro, che a seguito dell'iniezione il corpo produca degli anticorpi, il cui effetto è quello di inibire il funzionamento della tossina. Altri possibili effetti collaterali che possono verificarsi nel caso in cui l'iniezione non venga fatta nel modo corretto, sono: intorpidimento e reazioni allergiche del sito di iniezione.

Capitolo 3

Deambulazione e analisi del cammino

La deambulazione è una delle attività quotidiane principali, e per un soggetto sano consiste nell'effettuare una serie di movimenti coordinati in maniera ciclica al fine di muoversi nello spazio. L'analisi del cammino consente di studiare la deambulazione del soggetto per capire quanto questa differisca da una deambulazione di tipo fisiologico, e può essere eseguita: in maniera osservazionale mediante l'utilizzo di scale cliniche, oppure in maniera strumentale. In quest'ultimo caso è possibile ottenere i parametri spazio-temporali, la cinematica e la dinamica articolare, e le tempistiche di attivazione muscolare, in modo da poter fare un confronto con i dati di un cammino fisiologico. Uno dei possibili modi di effettuare l'analisi del cammino prevede l'utilizzo del sistema di acquisizione Vicon, il quale permette di acquisire una serie di camminate effettuate dal soggetto, che possono poi essere processate tramite il software "Nexus", al fine di ricavare i parametri precedentemente citati.

3.1 La deambulazione

La deambulazione è una delle attività quotidiane principali, in quanto consente all'essere umano di muoversi nello spazio per praticare tutte le attività primarie. L'abilità nel camminare viene acquisita durante i primi mesi di vita, ed una volta affinata è normalmente mantenuta fino alla vecchiaia, quando muoversi inizia a diventare sempre più difficile a causa dell'avanzata età o di patologie.

È un'attività di tipo ciclico, quindi per spostarsi da un luogo ad un altro nello spazio il corpo esegue un certo numero di "passi", ognuno dei quali costituito da una serie di sotto movimenti che, nel caso di un soggetto sano, si ripetono all'incirca sempre uguali. All'interno del singolo passo si possono identificare due macro fasi: la fase di appoggio (o stance phase), in cui il piede è a contatto con il terreno e corrisponde al 60% del ciclo

del passo, e la fase di pendolamento, in cui il piede è sollevato in aria e corrisponde al 40% del ciclo del passo.

La fase di appoggio può essere ulteriormente suddivisa nelle fasi di singolo supporto (un solo piede a contatto con il terreno) e doppio supporto (entrambi i piedi a contatto con il terreno). In **Figura 38** è riportato lo schema della suddivisione in macrofasi.

Le macro fasi appena descritte possono essere ulteriormente suddivise nelle seguenti sotto-fasi, rappresentate in **Figura 39**.

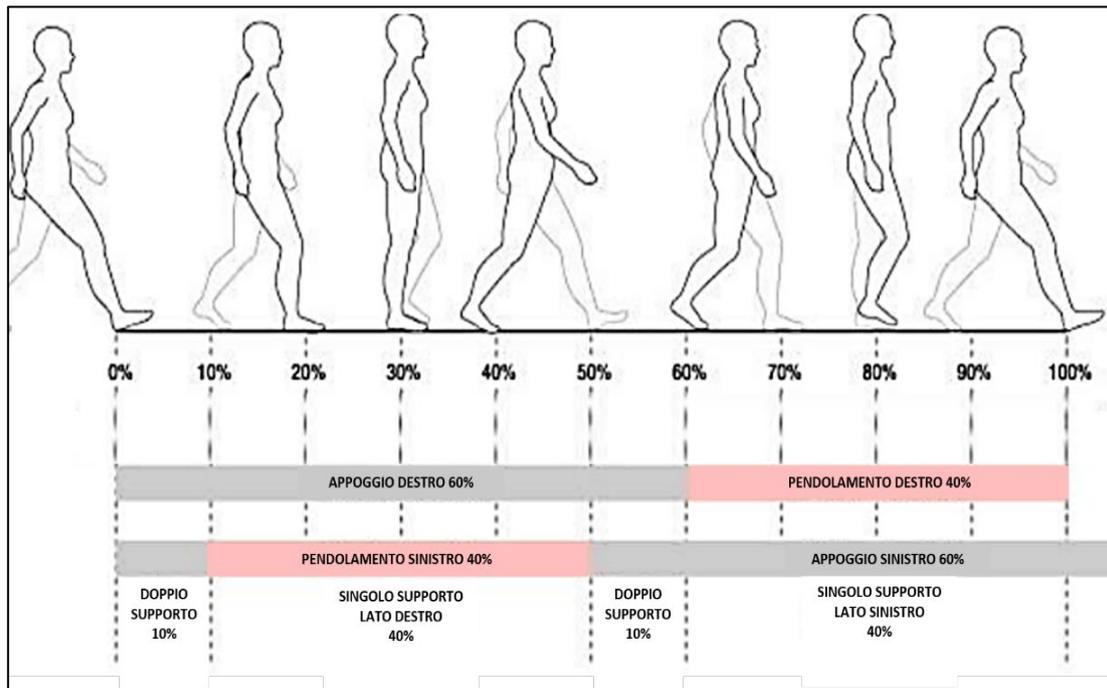


Figura 38. Fasi di appoggio e pendolamento per piede destro e sinistro durante un ciclo del passo e fasi di singolo e doppio supporto.

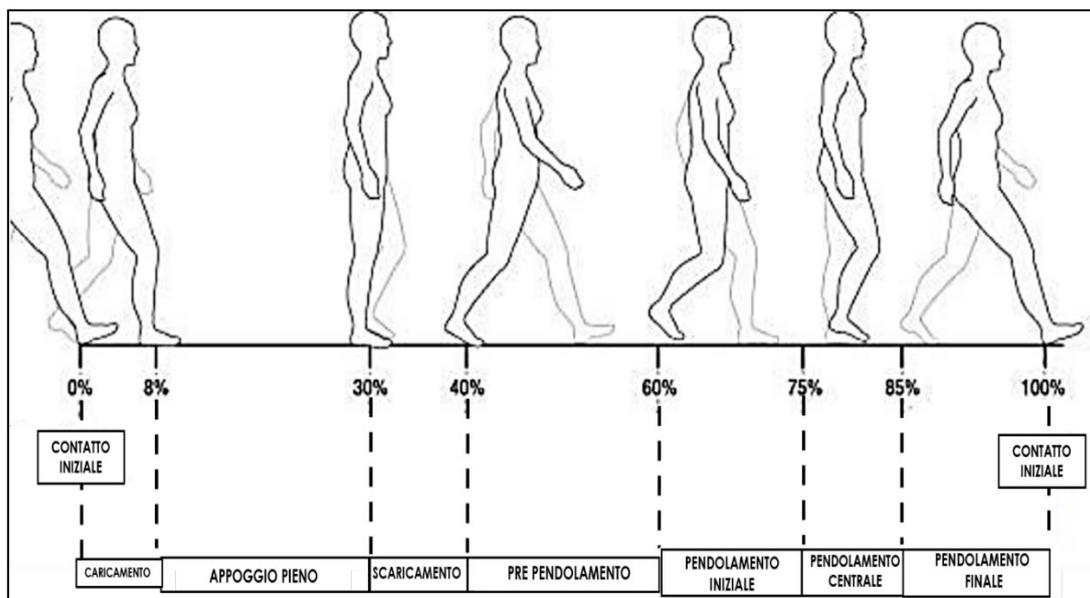


Figura 39. Sotto-fasi del ciclo del passo.

- Contatto iniziale (0% del ciclo del passo): è il momento in cui il calcagno impatta con il suolo e quindi l'inizio della macro fase di appoggio.
- Caricamento (0% -8% del ciclo del passo): la pianta del piede è tutta a contatto con il terreno.
- Appoggio pieno (8% -30% del ciclo del passo): l'arto controlaterale supera in pendolamento l'arto appoggiato al suolo.
- Scaricamento (30% -40% del ciclo del passo): il calcagno si distacca dal suolo.
- Pre pendolamento (40%-60% del ciclo del passo): è il momento in cui anche le dita si distaccano dal suolo e quindi il termine della macro fase di appoggio e l'inizio della macro fase di pendolamento.
- Pendolamento iniziale (60%-75% del ciclo del passo): il soggetto accelera la gamba in avanti.
- Pendolamento centrale (75% e l'85% del ciclo del passo): il piede in pendolamento supera il corpo.
- Pendolamento finale: è il momento in cui il soggetto decelera e il piede si prepara per il successivo appoggio, e quindi la fine della macro fase di pendolamento.

È possibile distinguere i tratti caratteristici di un cammino fisiologico facendo riferimento sia agli angoli che si formano tra i segmenti delle articolazioni coinvolte, sia alle tempistiche di attivazione dei muscoli durante il ciclo del passo. Nel piano sagittale, durante il ciclo del passo, vengono analizzati gli angoli di pelvi, anca, ginocchio e

caviglia, che sono riportati nelle **Figure Figura 40, Figura 41, Figura 42 e Figura 43**, mentre in **Figura 44** vengono riportati i loro andamenti caratteristici.

Per quanto riguarda invece i muscoli coinvolti nel cammino ve ne sono diversi, alcuni risultano solo minimamente attivi durante il ciclo del passo mentre altri hanno picchi di attivazione più importanti (**Figura 45**). Esclusivamente per i muscoli la cui attivazione risulta importante, in **Figura 45** vengono riportate le tempistiche con cui essi si attivano, rappresentate mediante delle barre rosse. I muscoli sopracitati e non appartenenti al complesso gamba-caviglia-piede sono stati inoltre rappresentati nelle **Figure 46, 47, 48, e 49**, mentre per quanto riguarda quelli appartenenti al complesso gamba-caviglia-piede, possono essere prese a riferimento le **Figure 18, 19, 20, 21 e 22**

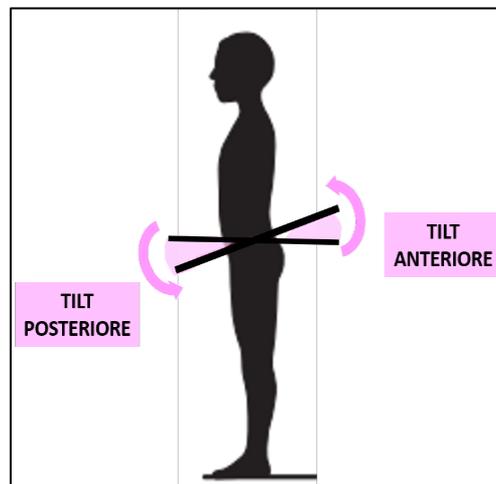


Figura 40. Angoli di rotazione delle pelvi (Neumann, 2013).

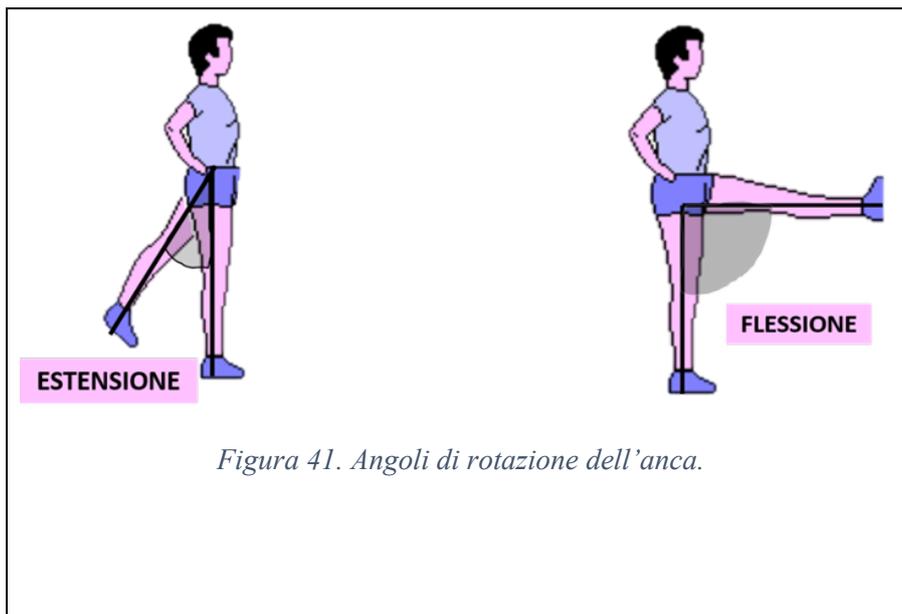


Figura 41. Angoli di rotazione dell'anca.

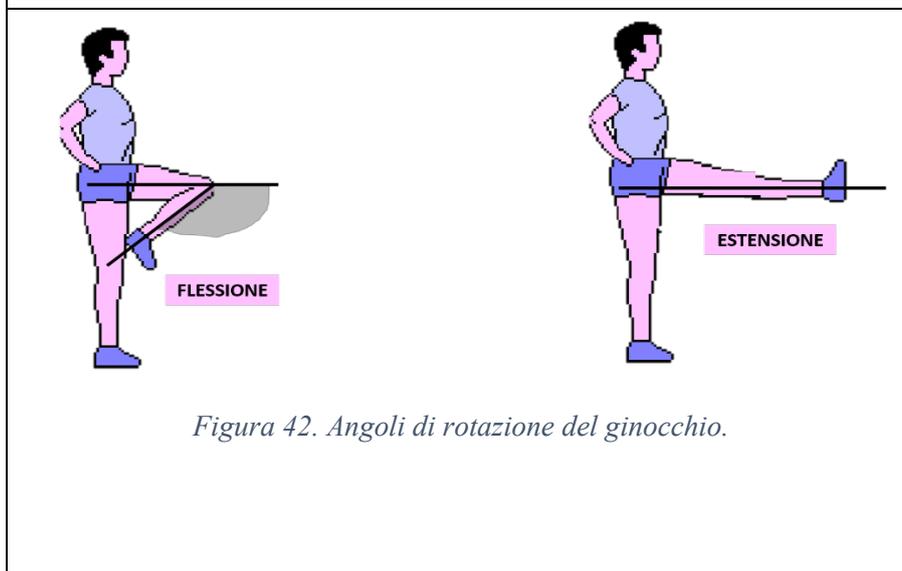


Figura 42. Angoli di rotazione del ginocchio.

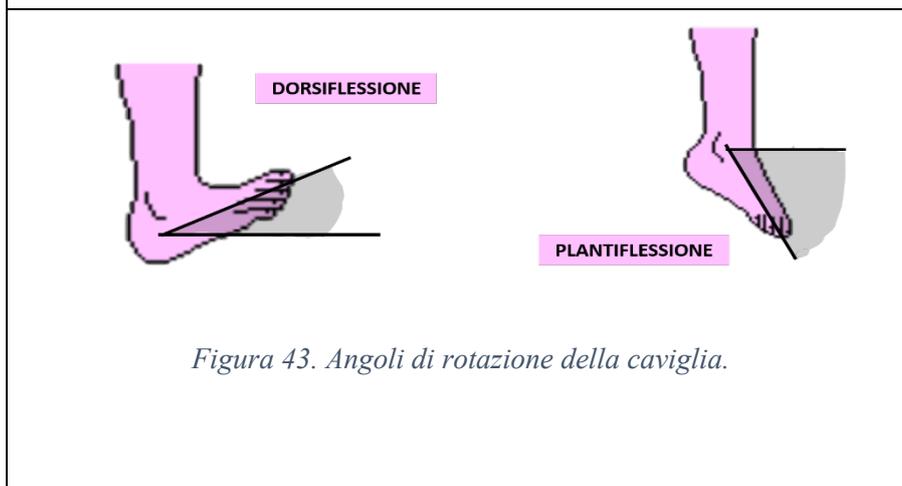


Figura 43. Angoli di rotazione della caviglia.

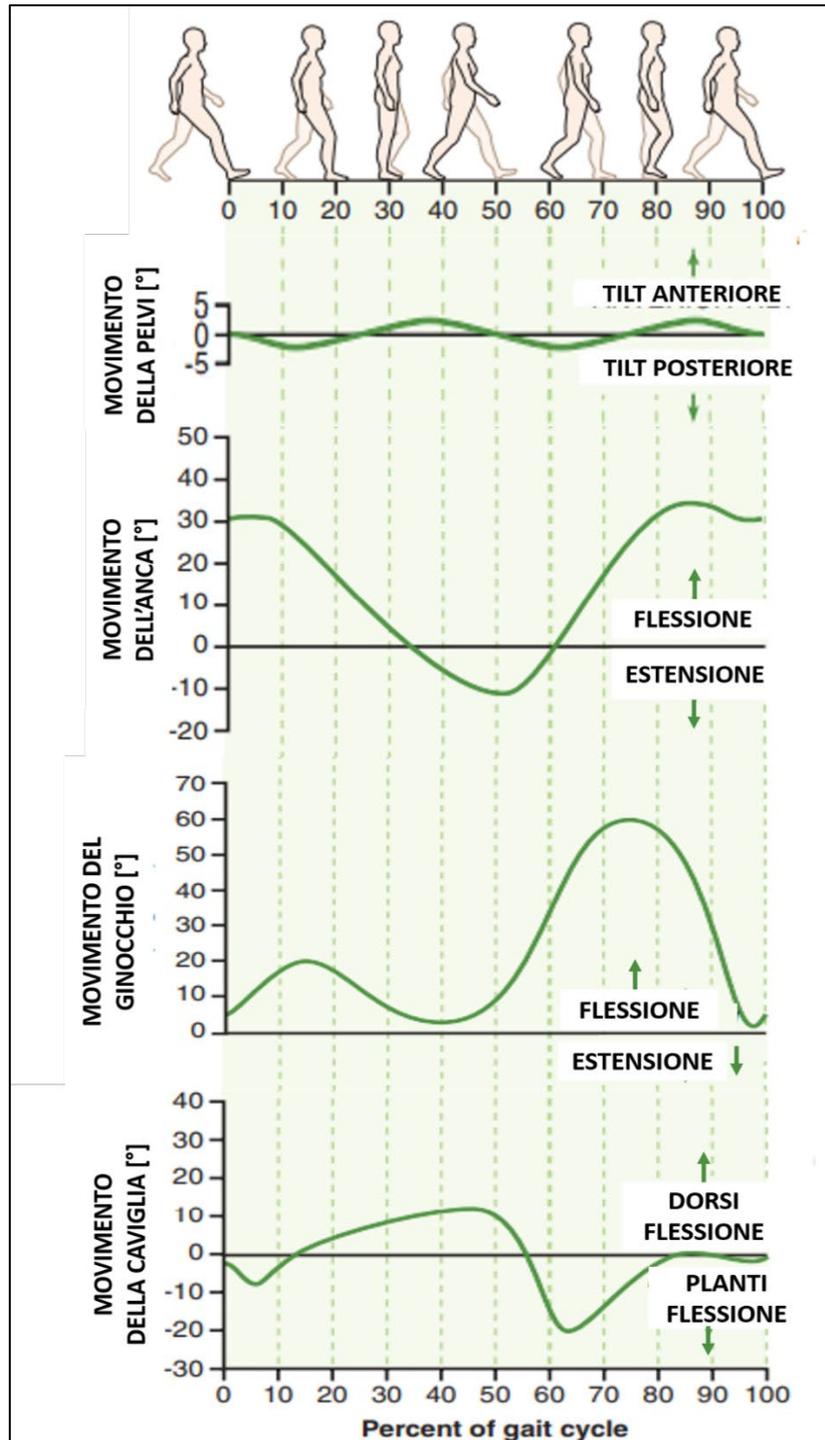


Figura 44. Andamenti fisiologici degli angoli di pelvi, coscia, ginocchio e caviglia durante il ciclo del passo (Neumann, 2013)

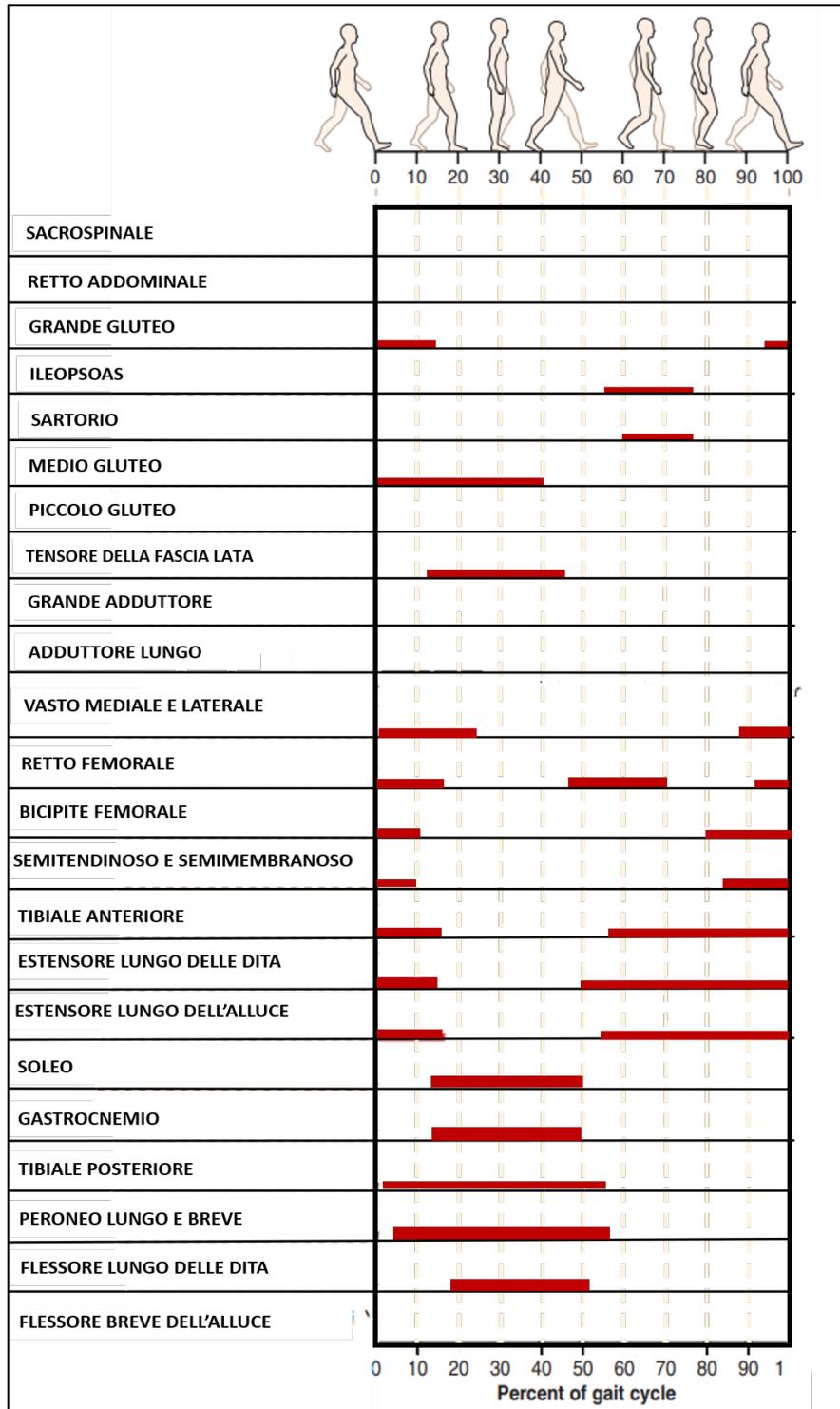


Figura 45. Tempistiche di attivazione fisiologiche dei muscoli durante il ciclo del passo (Neumann, 2013)

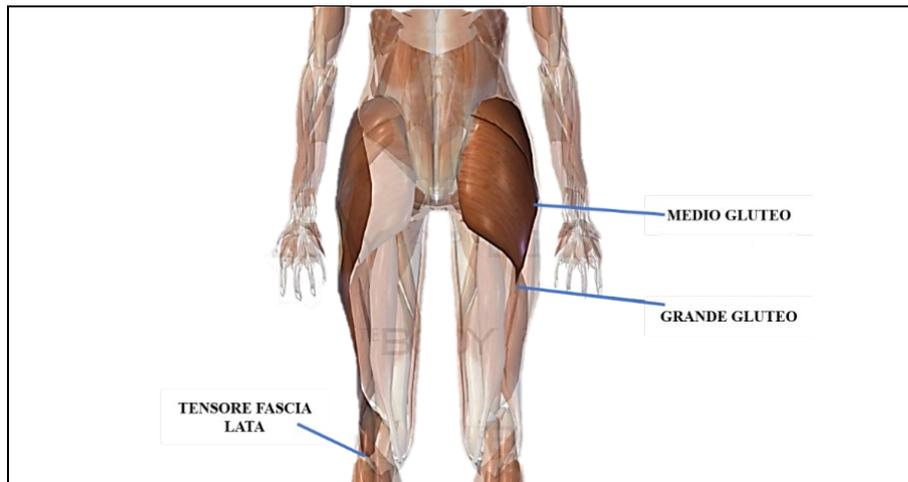


Figura 46. Alcuni dei muscoli con attivazione importante durante il ciclo del passo.

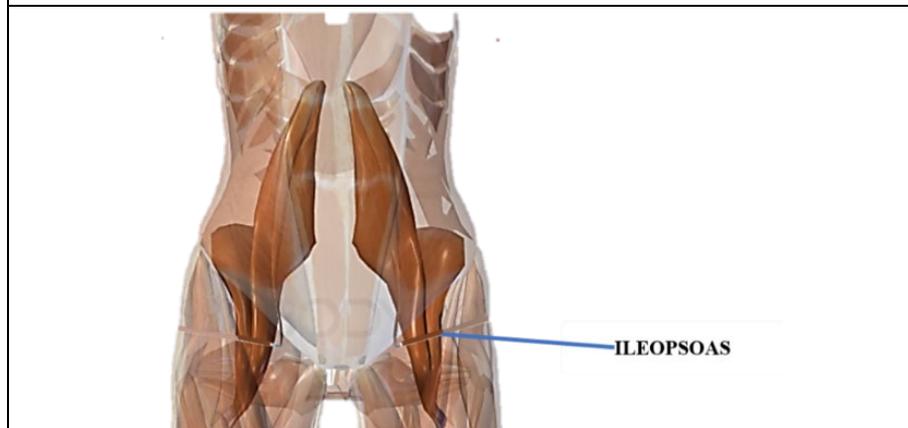


Figura 47. Alcuni dei muscoli con attivazione importante durante il ciclo del passo

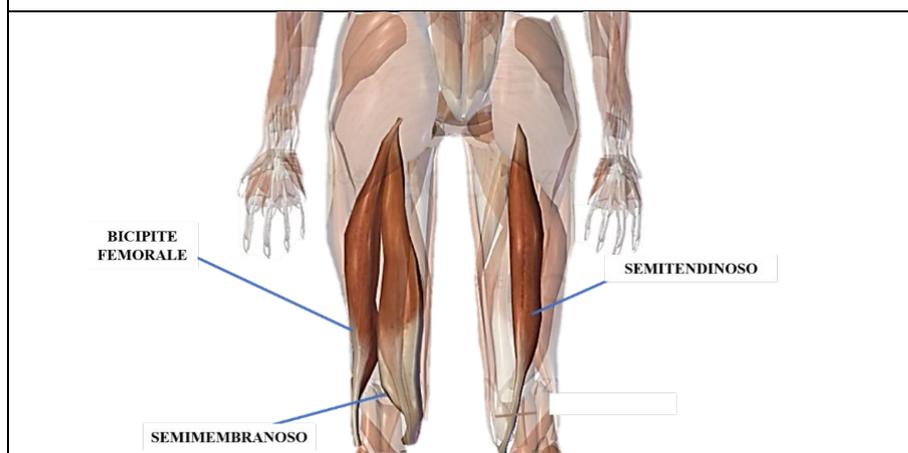


Figura 48. Alcuni dei muscoli con attivazione importante durante il ciclo del passo.

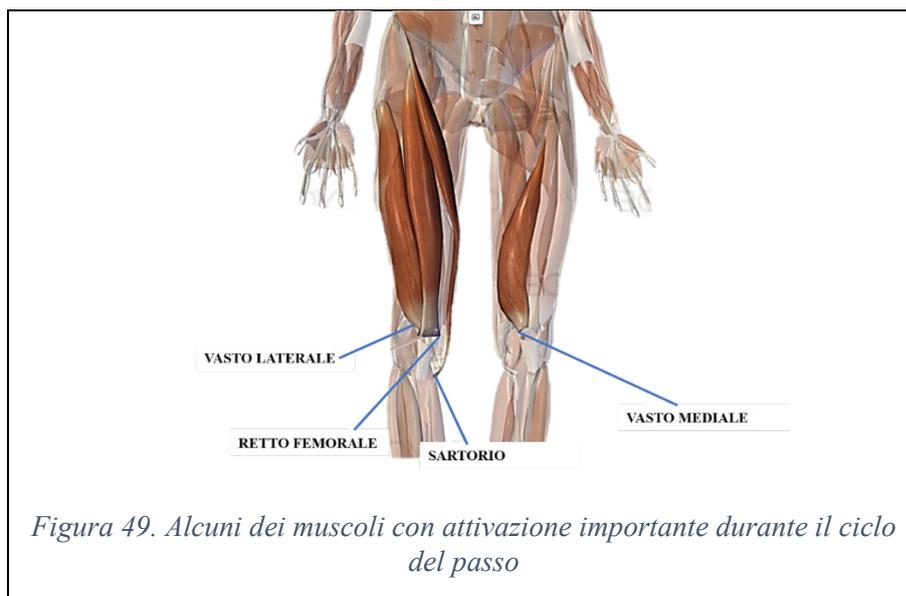


Figura 49. Alcuni dei muscoli con attivazione importante durante il ciclo del passo

3.2 L'analisi del cammino

I primi studi sulla deambulazione risalgono al 1836 ad opera dei fratelli Weber, i quali per mezzo di strumenti semplici come il cronometro ed il metro, raccolsero informazioni sul cammino dell'essere umano quali: la lunghezza del passo, la cadenza, la distanza tra il piede e il suolo, la durata delle fasi di appoggio singolo e doppio e della fase di pendolamento. Successivamente, con il progredire delle tecnologie in campo cinematografico, è stato possibile anche registrare il cammino, inizialmente soltanto sul piano sagittale e poi, tra il 1895 e il 1904, Braune e Fisher furono i primi ad effettuare un'analisi tridimensionale. Furono inoltre sempre loro i primi ad effettuare una analisi di tipo dinamico, misurando quantità come l'accelerazione dei segmenti ed i carichi intersegmentali (Neumann, 2013).

Ad oggi l'analisi del cammino può avvenire mediante valutazioni di tipo sia quantitativo che qualitativo. Un'analisi di tipo qualitativo viene condotta mediante l'osservazione diretta del cammino, ma richiede che l'osservatore conosca la fisiologia corretta di quest'ultimo in modo da identificare eventuali discordanze. Alternativamente è possibile registrare una ripresa video del cammino e analizzare successivamente ogni singolo fotogramma, con la possibilità ulteriore di confrontarli gli uni con gli altri.

Un'analisi di tipo quantitativo può essere invece condotta usando scale cliniche di valutazione, quindi osservando il cammino ed esprimendo un punteggio per determinati parametri che sia indicativo di quanto questi siano lontani o vicini rispetto al fisiologico, ma anche in questo caso è necessario che l'osservatore sia esperto del campo. In alternativa è possibile fare una valutazione di tipo strumentale.

Il primo gruppo di parametri valutabile mediante analisi strumentale, con attrezzatura semplice quale metro e cronometro (ma eventualmente anche con la strumentazione più complessa utilizzata per la cinematica e la dinamica) è quello dei parametri spazio-temporali, di cui i principali sono: la velocità del cammino [m/s], la cadenza [passi/minuto], la lunghezza complessiva del passo [m], la lunghezza del' emipasso [m], la larghezza del passo [m], l'angolo del piede [°], il tempo trascorso dal singolo arto in appoggio o in pendolamento [s], il tempo del passo [s] e le percentuali del ciclo del passo in corrispondenza delle quali si verificano gli eventi principali descritti nella sezione precedente [% ciclo del passo]. Un esempio di come si presentino alcuni di questi parametri è riportato in **Figura 50**.

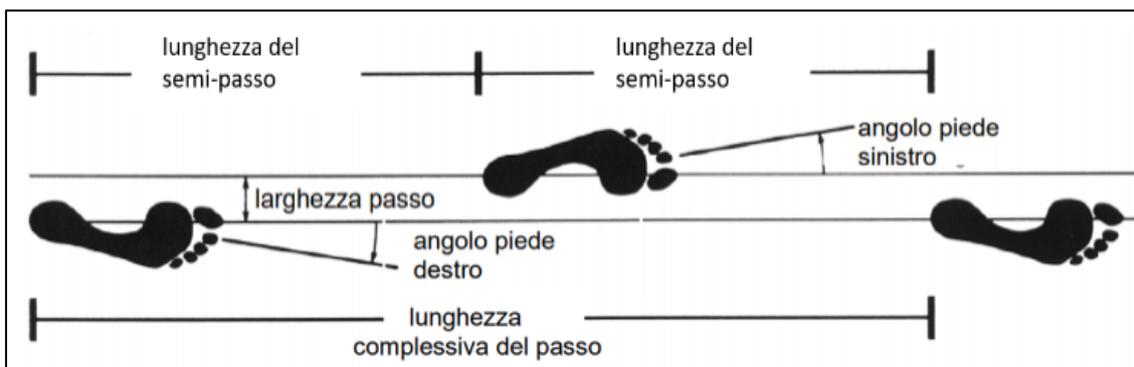


Figura 50. Esempi di parametri spazio-temporali

Il secondo gruppo di parametri che può essere valutato è quello dei parametri cinematici: acquisire la cinematica di uno o più segmenti significa conoscere istante per istante la posizione, la velocità e l'accelerazione di quei segmenti nello spazio. I sistemi che si utilizzano in questo caso possono essere tipo ottico e non ottico.

I sistemi di tipo non ottico fanno uso di diversi strumenti, alcuni esempi sono: i goniometri, usati per misurare l'escursione delle articolazioni durante i movimenti, gli accelerometri, usati per misurare le accelerazioni lineari dei segmenti corporei sui quali vengono posizionati (ed una volta note queste è possibile risalire anche a velocità e posizione) e i giroscopi, utilizzati per misurare le accelerazioni angolari (ed una volta note queste è possibile risalire anche a velocità angolari ed angoli).

I sistemi di tipo ottico, invece, si basano sulla "stereofotogrammetria", che consiste nella ricostruzione 3D di un punto che si muove nello spazio. Per un sistema di tipo ottico si prevede l'utilizzo di "markers", ossia supporti di materiale plastico che possono riflettere la luce (markers passivi) o emetterla (markers attivi).

I marker passivi sono supporti di materiale plastico ricoperti da pellicola catarifrangente: quando illuminati essi riflettono la luce, la quale viene catturata da telecamere a

infrarosso, e questo permette di acquisirne la posizione nello spazio. I markers di tipo attivo al contrario non necessitano di illuminazione esterna, in quanto generano luce autonomamente. In **Figura 51** vengono rappresentati esempi di entrambi i tipi di markers. In generale, per l'analisi del movimento, il corpo umano viene modellizzato come una catena di segmenti rigidi, ognuno dei quali rappresenta uno dei segmenti ossei d'interesse. In base allo scopo per il quale si sta effettuando l'analisi, si può definire il modello del singolo arto, di più arti o che includa l'intero corpo umano, ed in base al grado di accuratezza voluto, si può modellizzare un numero più o meno alto di segmenti all'interno dell'arto scelto. Un esempio di modello a segmenti rigidi degli arti inferiori è riportato in **Figura 52**, e come si può vedere si utilizzano tre colori: il blu per indicare le pelvi, il verde per l'arto destro e il rosso per l'arto sinistro.

Il posizionamento dei markers avviene in corrispondenza dei cosiddetti "punti di reperi anatomici" (ad eccezione dei marker attaccati alle bacchette come si vede in **Figura 51**, ossia dei punti in cui l'osso sporge e ci sono pochi tessuti che si interpongono tra esso e il marker (ad esempio i malleoli), e questo permette di poter approssimare la posizione del marker con quella dell'osso

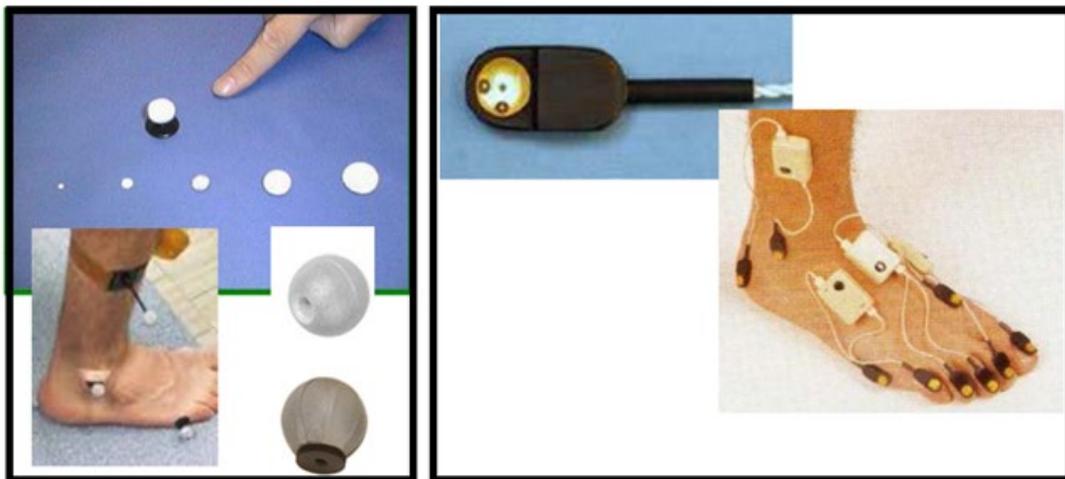


Figura 51. Esempio di markers passivi (a sinistra) ed esempio di markers attivi (a destra).

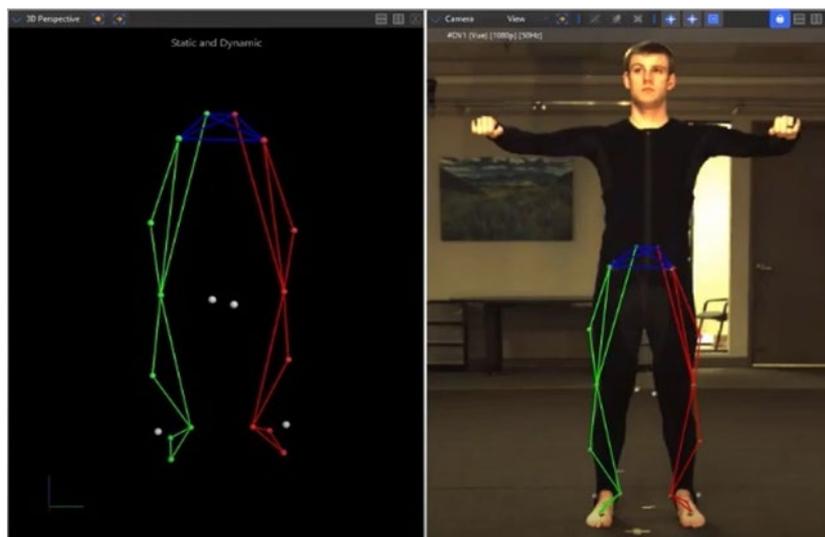


Figura 52. Esempio di modello a segmenti rigidi [k]

L'analisi cinematica del cammino con sistemi stereofotogrammetrici viene eseguita mediante diversi step, primo tra tutti la definizione di un modello a segmenti rigidi di arto inferiore. Una volta definito, è necessario pedalare il modello attribuendogli le stesse dimensioni del soggetto, quindi si procede con l'acquisizione di alcune misure antropometriche di quest'ultimo, quali: massa totale, distanza tra le spine iliache, lunghezza delle cosce, circonferenza delle cosce, lunghezza delle gambe, circonferenza delle gambe, diametro delle ginocchia, larghezza dei malleoli, altezza dei malleoli, lunghezza e larghezza dei piedi. La rappresentazione delle misure è riportata in **Figura 53**.

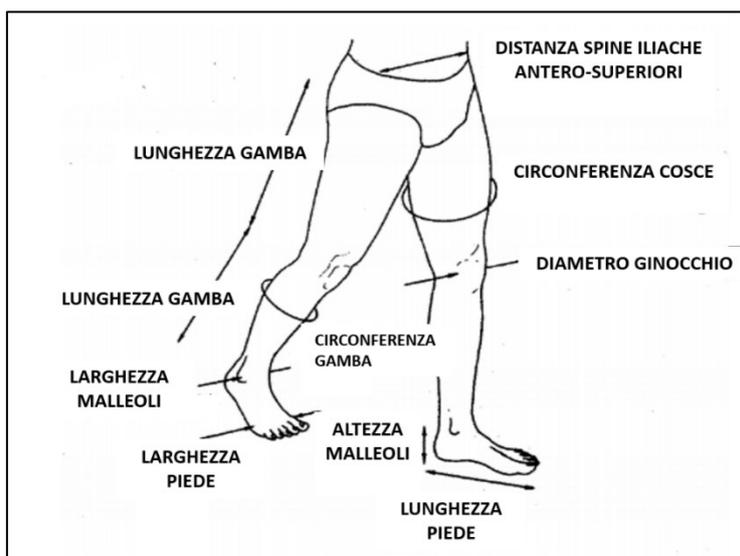


Figura 53. Misure antropometriche

Lo step successivo prevede l'apposizione dei marker sul soggetto e l'acquisizione della loro posizione rispetto al sistema di riferimento globale, mediante l'utilizzo di almeno due telecamere. Dal momento che la posizione del singolo segmento può essere determinata conoscendo le posizioni di tre punti solidali ad esso, è richiesto che siano apposti almeno tre marker su ciascuno. Identificando la posizione di un punto notevole sul segmento rispetto alla terna locale definita dai tre marker, di cui si riporta un esempio in **Figura 54**, e conoscendo la posizione di questi rispetto alla terna globale, è possibile risalire alla posizione del punto notevole rispetto a quest'ultima. Un esempio di posizionamento dei markers è riportato in **Figura 55**.

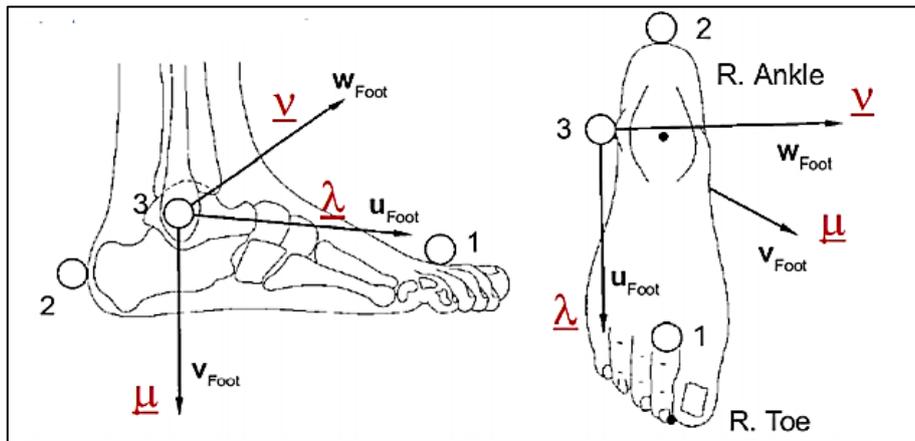


Figura 54. Terna locale definita in base a tre marker per il segmento del piede.

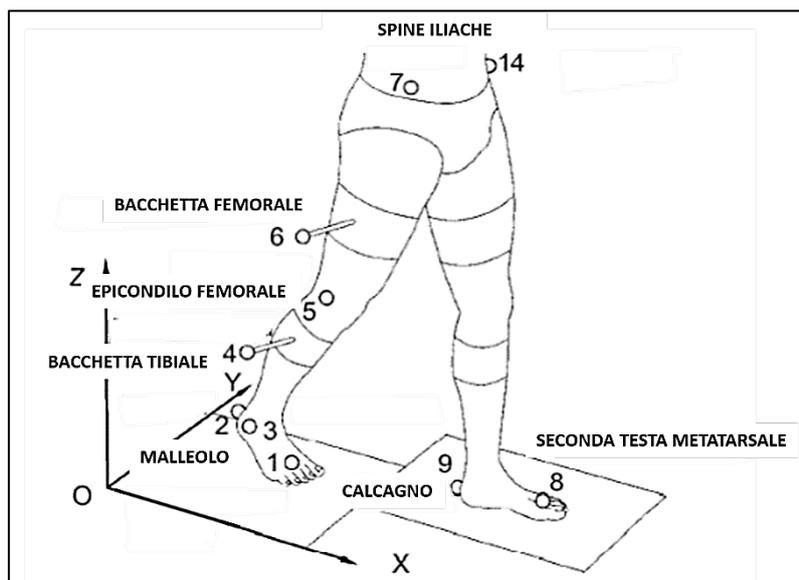


Figura 55. Esempio di posizionamento di alcuni markers.

Conoscendo quindi il vettore posizione rispetto alla terna globale del punto notevole del singolo segmento, è possibile risalire alla posizione del suo baricentro, così come alla velocità e all'accelerazione. Definendo inoltre una terna posizionata nel baricentro del segmento, costituita da assi di riferimento anatomici, è possibile ricavare la sua orientazione rispetto al sistema globale e quindi gli angoli che il segmento raggiunge durante il cammino. Un esempio di terne posizionate nei baricentri dei segmenti è riportato in **Figura 56**.

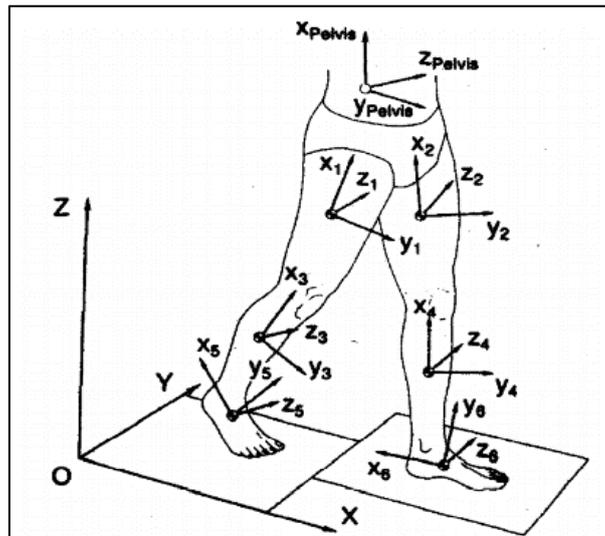


Figura 56. Terne posizionate nei baricentri dei singoli segmenti.

Quindi, mediante l'utilizzo di markers e telecamere a infrarosso, è possibile acquisire durante la camminata del soggetto: la posizione dei singoli segmenti nelle tre dimensioni, gli angoli relativi tra di essi, le loro velocità ed accelerazioni e la posizione dei centri articolari, il tutto rispetto al sistema di riferimento del laboratorio.

Il terzo tipo di valutazione che può essere fatta è l'analisi dinamica: acquisire la dinamica durante il cammino equivale a conoscere l'intensità della forza generalizzata (si intende l'insieme di sei componenti, tre di forza e tre di momento) che il piede scambia con il terreno durante tutta la fase di appoggio. Un esempio di componente della reazione vincolare piede terreno nel piano sagittale è riportato in **Figura 57**.

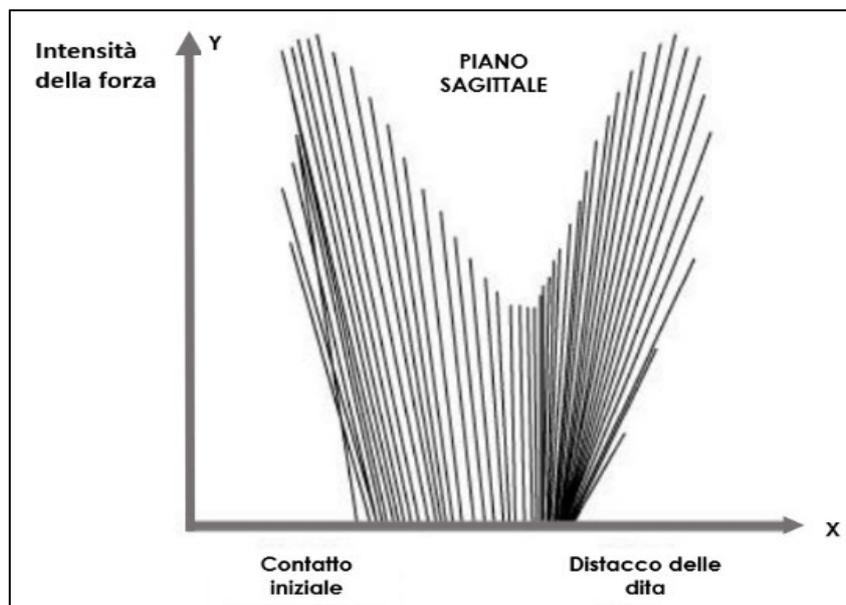


Figura 57. Esempio di acquisizione della reazione vincolare piede-terreno nel piano sagittale

L'acquisizione può essere fatta mediante "pedane dinamometriche" le quali possono essere di tipo:

- Estensimetrico: costituite da due piastre e quattro pilastri, ognuno dei quali ha apposti 3 estensimetri. Gli estensimetri producono un segnale proporzionale alla deformazione del pilastro, la quale è a sua volta proporzionale alla forza applicata sulla pedana superiore. Un esempio di pedana estensimetrica è riportato in **Figura 58**.
- Piezoelettrico: costituite piastre di materiale piezoelettrico. Questo materiale ha la proprietà di produrre un segnale elettrico proporzionale alla sua deformazione, la quale a sua volta è proporzionale alla forza applicata sulla pedana stessa. Un esempio di pedana piezoelettrica è riportato in **Figura 59**.

Una volta nota l'intensità della reazione piede-terreno, ed effettuata l'analisi cinematica, è possibile mediante un procedimento di dinamica inversa risalire alle forze intersegmentali. In particolare, note velocità ed accelerazioni dei singoli segmenti unitamente alle loro masse, è possibile calcolare forze e momenti di inerzia per ciascuno e, nota la forza generalizzata piede-terreno, è possibile utilizzare queste informazioni per risolvere le equazioni di Newton-Eulero. Queste equazioni permettono di risalire alla forza generalizzata che si sviluppa tra il piede ed il segmento che lo precede, in questo caso la gamba.

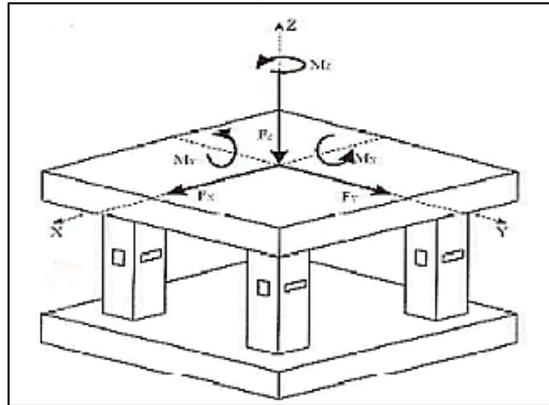


Figura 58. Esempio di pedana estensimetrica

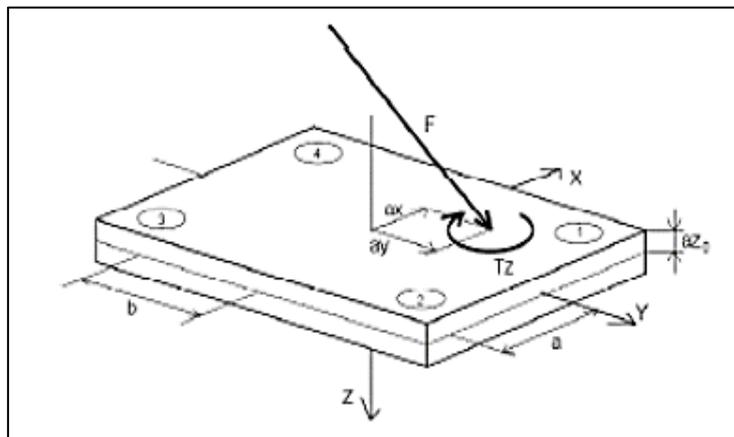


Figura 59. Esempio di pedana piezoelettrica.

Quindi, partendo dal piede e andando a ritroso è possibile calcolare le cosiddette “forze intersegmentali”, ossia le forze (anch’esse generalizzate) che si sviluppano all’interno delle articolazioni, le quali a loro volta sono costituite da due componenti: le forze muscolari e le forze articolari.

Come detto in precedenza, la contrazione muscolare viene innescata dalla propagazione di un potenziale elettrico dal cervello fino alle fibre muscolari, e una volta che il segnale ha raggiunto la giunzione neuromuscolare, esso si propaga all’interno della fibra stessa. Il potenziale che si trova all’interno delle fibre muscolari prende il nome di segnale elettromiografico (EMG) e, un’ulteriore valutazione, consiste nell’acquisire questo segnale dai muscoli che prendono parte alla deambulazione per valutare se essi si attivino con le tempistiche corrette. Il segnale EMG può essere acquisito mediante elettrodi ad ago o elettrodi transdermici: con i primi l’acquisizione è più precisa in quanto penetrano direttamente nel muscolo, tuttavia per il soggetto risulta difficile muoversi, mentre i secondi, che vengono attaccati sulla pelle in corrispondenza del muscolo, risultano più

comodi, ma il segnale acquisito risulta meno preciso a causa degli strati di derma presenti tra l'elettrodo ed il muscolo.

I muscoli che si attivano in maniera importante durante il cammino sono: grande gluteo, ileopsoas, sartorio, medio gluteo, tensore della fascia lata, vasto mediale e laterale, retto femorale, bicipite femorale, semitendinoso e semimembranoso, tibiale anteriore e posteriore, estensore lungo delle dita e dell'alluce, soleo, gastrocnemio, peroneo lungo e breve e flessore lungo delle dita.

Una volta acquisito il segnale da questi muscoli durante la camminata, lo si elabora e si stabilisce una soglia oltre la quale il muscolo può essere considerato attivo.

3.3 Il sistema Vicon-Nexus

Vicon è un sistema di acquisizione di tipo optoelettronico che, unitamente al software Nexus, permette di acquisire e processare i parametri spazio-temporali, cinematici, dinamici ed il segnale elettromiografico durante il cammino di un soggetto.

I componenti principali della parte hardware sono: camere ad infrarosso, camere video, pedane dinamometriche, sonde per l'acquisizione del segnale EMG e l'Active Wand.

Per eseguire un'analisi del cammino utilizzando questo sistema vengono seguiti i seguenti passi:

- **Calibrazione del sistema:**

si divide in calibrazione statica e calibrazione dinamica, precedute dal cosiddetto "mascheramento delle camere", una procedura che assicura l'eliminazione di riflessi indesiderati che potrebbero confondersi con l'acquisizione dei marker.

La calibrazione dinamica è necessaria per definire la posizione reciproca delle telecamere e viene fatta mediante l'oggetto "Active Wand" riportato in **Figura 60**. La procedura consiste nell'entrare all'interno del volume di cattura con l'Active Wand in mano e muoverlo in modi prestabiliti al fine di farlo rientrare nel campo visivo di tutte le telecamere, sia ad infrarossi che video.

La calibrazione statica è necessaria invece al fine di definire un sistema di riferimento globale all'interno del laboratorio, e consiste nell'acquisire la posizione dell'Active Wand quando questa viene posizionata al centro delle due pedane di forza, come mostrato in **Figura 61**.

- **Creazione di un nuovo database:**

al suo interno verranno inseriti la classificazione del paziente, il nome e la nuova sessione di analisi.

- **Definizione del "marker set":**

esistono diversi modelli e ognuno prevede l'utilizzo di un certo numero di markers, nel caso del sistema Vicon è possibile utilizzare il modello ufficiale chiamato "Plug in Gait Lower Body" oppure l'utente può creare modello custom. Un esempio di modelli custom sono quelli che si focalizzano solo su determinati arti o parti del corpo.



Figura 60. Active Wand.

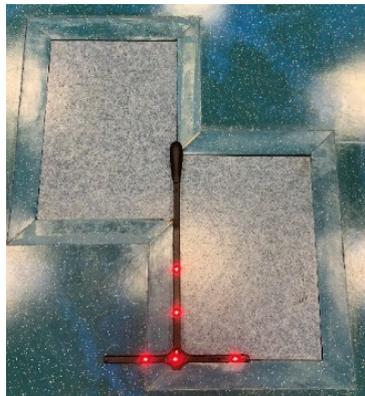


Figura 61. Posizionamento dell'Active Wand per la calibrazione statica

○ **Acquisizione delle misure antropometriche:**

le misure, che vengono acquisite manualmente, sono: altezza, massa, distanza tra le creste iliache anteriori, lunghezza delle gambe, larghezza delle ginocchia e larghezza delle caviglie. Al termine dell'acquisizione vengono inserite in Nexus per la corretta ricostruzione del modello.

● **Posizionamento dei markers:**

i markers vengono posizionati, per entrambi i lati del corpo in alcuni punti di reperi prestabiliti. I punti in questione sono: spina iliaca anteriore e posteriore,

coscia, ginocchio, tibia, caviglia, tallone, alluce, epicondilo mediale e malleolo mediale.

- **Posizionamento degli elettrodi per EMG sui muscoli del soggetto.**

- **Istruzione del soggetto:**

risulta importante che il soggetto cammini nella maniera più naturale possibile, ma cercando comunque di mantenere una direzione parallela al piano frontale definito nel sistema di riferimento globale. Se necessario, è possibile fare uso di: stampelle, deambulatori o anche di una persona esterna.

- **Acquisizione della prova statica:**

il soggetto si posiziona sulla pedana, con le braccia conserte, mantenendo la postura eretta e si esegue l'acquisizione. Partendo dalle immagini acquisite, si ricrea su Nexus la posizione dei markers in 3D, assegnando il nome ad ognuno di essi (può essere fatto in maniera automatica dal software o manualmente dall'utente). Si esegue infine la pipeline necessaria ad adattare il generico modello costituito dai markers alle misure del soggetto precedentemente inserite. È possibile visualizzare un effetto grafico delle operazioni citate in **Figura 62**.

<i>Ricostruzione</i>	<i>Labeling (Autoinitialized)</i>	<i>Run Static Plug In Gait Model</i>
		

Figura 62. Effetto grafico delle operazioni eseguite

- **Acquisizione delle prove dinamiche:**

la singola prova dinamica consiste nell'effettuare una camminata all'interno del volume di cattura. Per ogni passaggio si effettua una registrazione cercando di registrare almeno 10-12 cicli del passo (tenendo sempre conto dei bisogni del paziente e delle sue condizioni fisiche). Nel caso in cui il paziente sia in grado di

farlo, si può effettuare anche un'analisi dinamica, in questo caso è necessario che vengano registrati 3 passi destri e 3 passi sinistri bene a contatto con le pedane di forza. Non tutte le prove acquisite vengono utilizzate, in particolare si scartano: le prime due (perché il paziente deve ancora abituarsi), le ultime due (perché il paziente potrebbe essere stanco) ed in generale quelle che non sono venute bene (ad esempio se ci sono markers che non si vedono durante tutto il percorso). Una volta terminate le acquisizioni, gli elettrodi e i markers vengono rimossi dal paziente.

- **Post processing:**

- *Reconstruct and label.* Si ricostruisce la posizione dei markers in 3D partendo dalle immagini acquisite e si assegna un nome a ciascuno di essi, in questo caso è fatto in maniera automatica dal software grazie alla calibrazione del soggetto fatta durante la prova statica.
- *Interval identification.* Si individua la “zona d’interesse” ossia il periodo di tempo in cui il soggetto si trova all’interno del volume di cattura e si tagliano le parti della prova in cui invece si trova al di fuori.
- *Fill Gaps.* Si ricostruiscono eventuali tratti di traiettorie dei markers mancanti, dovuti a punti ciechi o a occlusioni articolari. Per questa operazione il software fornisce quattro diversi algoritmi, i quali ricostruiscono la parte di traiettoria mancante in base a principi diversi.
- *Plug in Gait Dynamics.* Il software propone delle pipeline per calcolare in maniera automatica le curve della cinematica e della dinamica, che possono eventualmente essere integrate con pipeline scritte dall’utente. Eventualmente è possibile anche individuare in maniera automatica, per ogni arto, gli istanti di contatto del calcagno e distacco delle dita, oppure, l’utente può inserirli manualmente (consigliato nel caso di un soggetto patologico).

Una volta terminato il processamento dei dati, è possibile visualizzare: i parametri spaziotemporali, le curve della cinematica e le curve della dinamica, sempre all’interno di Nexus, come mostrato nelle **Figure 63 e 64**.

Per quanto riguarda il segnale EMG, il sistema Vicon permette la sincronizzazione con il sistema di acquisizione, ed è quindi possibile ottenere i dati grezzi che possono essere elaborati con altri software, ad esempio Matlab o Polygon.

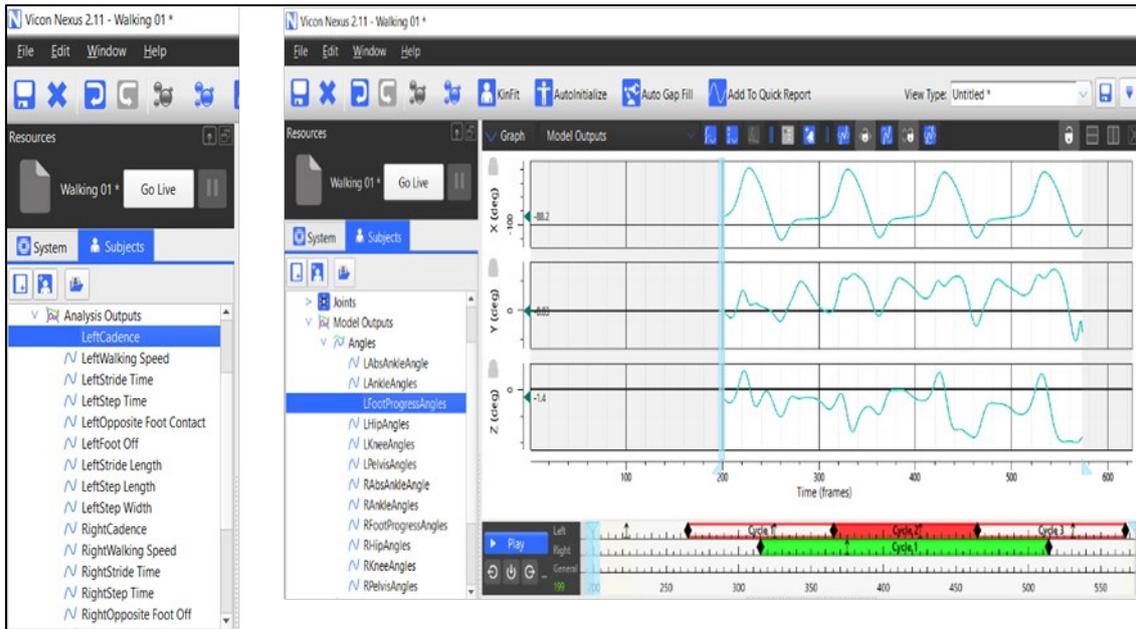


Figura 63. A sinistra un esempio di parametri spazio-temporali, a destra un esempio di cinematica [1]

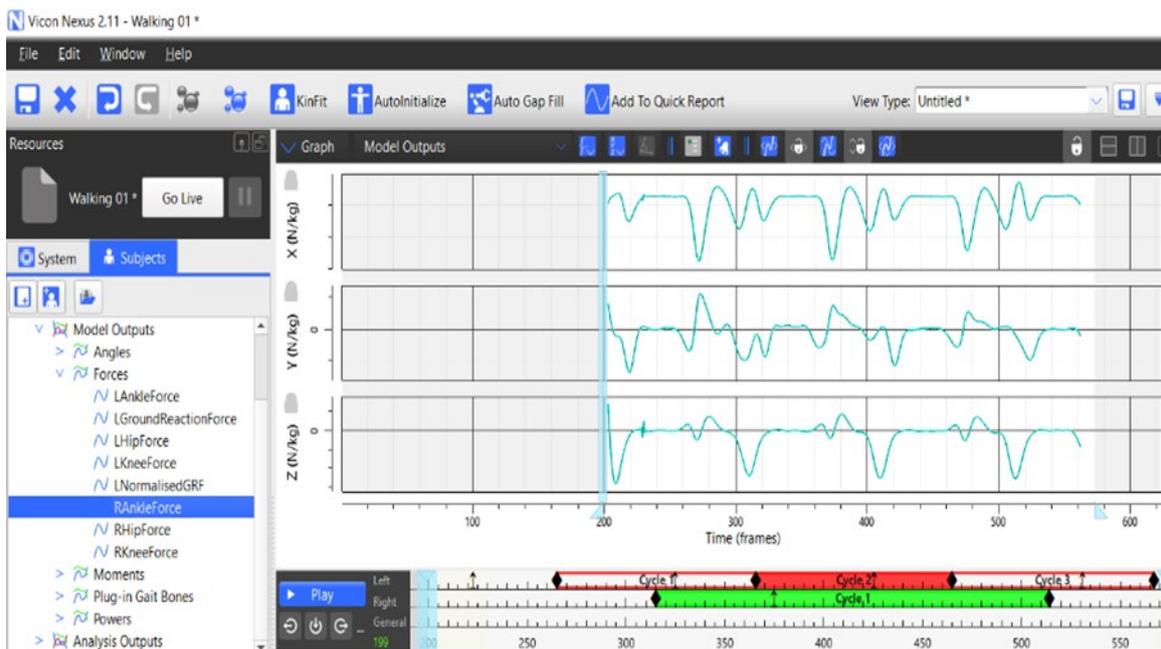


Figura 64. Esempio di dinamica calcolata dal software Nexus [1]

Capitolo 4

Stato dell'arte

Il piede equinovaro è uno tra i pattern più comuni che si manifestano nei pazienti colpiti da ictus e porta inevitabilmente ad alterazioni del cammino, le quali possono essere temporaneamente attenuate mediante l'utilizzo di tossina botulinica. Sono molti gli studi presenti in letteratura che valutano le differenze tra la deambulazione per pazienti affetti da spasticità post ictus e la deambulazione fisiologica, così come quelli che valutano l'evoluzione del cammino a seguito dell'iniezione di tossina botulinica. Nella maggior parte di essi tuttavia, non viene specificato quale sia precisamente il pattern dei soggetti oggetto di studio, e risulta quindi difficile isolare le valutazioni fatte esclusivamente per pazienti con piede equinovaro. Le valutazioni descritte in questo capitolo, specificamente effettuate per pazienti con piede equinovaro post ictus, riguardano lo stato e l'eventuale evoluzione a seguito dell'iniezione di tossina botulinica, di: cinematica articolare della caviglia del ginocchio, parametri spazio temporali del cammino, segnale EMG, parametri acquisiti mediante pedane di forza e punteggi assegnati mediante scale cliniche.

4.1 Valutazione della cinematica per pazienti con piede equinovaro post ictus

Il primo parametro di cui si può trovare una valutazione specifica per pazienti post -ictus con piede equinovaro è la cinematica. Bensoussan et al. (2006) forniscono un confronto, nel solo piano sagittale, tra la cinematica della caviglia patologica di tre soggetti con piede equinovaro e la cinematica della caviglia di tre soggetti sani. Lo stesso confronto viene poi fatto tra la cinematica della caviglia patologica e quella della caviglia sana dei soli pazienti. Si è osservato che nei soggetti sani il valore medio del ROM è uguale per entrambi gli arti ed è pari a $17,5^\circ$, con una deviazione standard di $3,3^\circ$. Al contrario, per i soggetti che hanno subito un ictus, il ROM dell'arto patologico mostra un valore medio di 31° e deviazione standard di $7,5^\circ$, maggiore sia del ROM dell'arto controlaterale (valore medio di 22° e deviazione standard di $8,8^\circ$) e che del ROM di soggetti sani. Gli

autori hanno attribuito l'ampiezza maggiore del ROM della caviglia patologica all'alto livello di spasticità dei muscoli soleo e gastrocnemio. Si è anche evidenziato come, nonostante durante la fase di pendolamento la cinematica della caviglia patologica presenti una plantiflessione maggiore del normale, l'altezza del piede da terra sia la stessa per arto sano e per arto patologico. Secondo gli autori, la giustificazione di questa egual misura risiede nel fatto che i pazienti hanno la tendenza a sollevare maggiormente il ginocchio appartenente all'arto patologico, al fine di evitare che il piede strisci a terra. Per quanto riguarda le modifiche della cinematica a seguito dell'iniezione di tossina botulinica, Bollens et al. (2013) hanno monitorato l'evolversi della cinematica articolare del ginocchio e della caviglia di otto pazienti con piede equinovaro post ictus a seguito dell'iniezione. Gli autori non hanno riportato i grafici ma soltanto alcuni valori selezionati, ovvero: la massima estensione del ginocchio in fase di appoggio, l'angolo della caviglia in corrispondenza dello 0% del ciclo del passo, e la massima dorsiflessione della caviglia in fase di appoggio ed in fase di pendolamento. Nella **Tabella 2** si riportano i valori citati acquisiti prima dell'iniezione di tossina botulinica e a distanza di due e sei mesi.

	Pre-iniezione	2 mesi post iniezione	6 mesi post iniezione
Massima estensione del ginocchio in fase di appoggio [°]	4.7 ± 26.8	8.7 ± 21.3	7.7 ± 20.2
Angolo della caviglia a 0% del ciclo del passo [°]	-6.8 ± 8.6	-7.1 ± 8.7	-4.7 ± 9.5
Massima dorsiflessione della caviglia in fase di appoggio [°]	6.8 ± 9.7	7.6 ± 9.3	9.5 ± 8.2
Massima dorsiflessione della caviglia in fase di pendolamento [°]	-6.6 ± 8.8	-6.6 ± 8.7	-4.0 ± 9.3

Tabella 2 Evoluzione dei valori assunti da alcuni punti significativi delle curve cinematiche di ginocchio e caviglia a seguito dell'iniezione di tossina botulinica riportati come media ± deviazione standard (Bollens et al., 2013)

Uno degli studi più completi per quanto riguarda la cinematica dei pazienti con piede equinovaro a seguito di ictus è quello di Benedetti et al.(2011), che riporta i grafici della cinematica della caviglia su tutti e tre piani. Lo studio è stato condotto su 5 pazienti, per ognuno dei quali è stata acquisita e riportata la cinematica della caviglia sui tre piani, sovrapposta all'andamento medio ricavato da 20 soggetti sani. I grafici degli andamenti appena citati sono riportati in **Figura 65.**: in grigio scuro sono evidenziati gli andamenti patologici, in grigio chiaro quelli fisiologici. È opinione degli autori che, per pazienti con piede equinovaro, un'analisi completa debba includere la cinematica su tutti e tre i piani

in quanto, come si vede dalla **Figura 65**, tutti i pazienti presentano un'eccessiva inversione ed un'eccessiva adduzione, le quali non sarebbero visibili se ci si limitasse ad una analisi nel solo piano sagittale.

Per poter fare un confronto di tipo quantitativo oltre che visivo, gli autori hanno riportato anche gli angoli raggiunti da alcuni punti significativi delle curve, quali: la dorsiflessione al contatto del calcagno, la massima plantiflessione raggiunta nella fase di caricamento, la massima dorsiflessione raggiunta durante la fase di appoggio, la plantiflessione al distacco delle dita, la massima plantiflessione raggiunta durante il pendolamento, la massima inversione e la massima adduzione in fase di pendolamento, la massima eversione e la massima abduzione in fase di appoggio, ed il ROM in tutti e tre i piani. Si riportano questi valori, ricavati come media dei valori calcolati per i 5 pazienti, nella **Tabella 3**, insieme alla media degli stessi valori ricavati per i 20 soggetti sani.

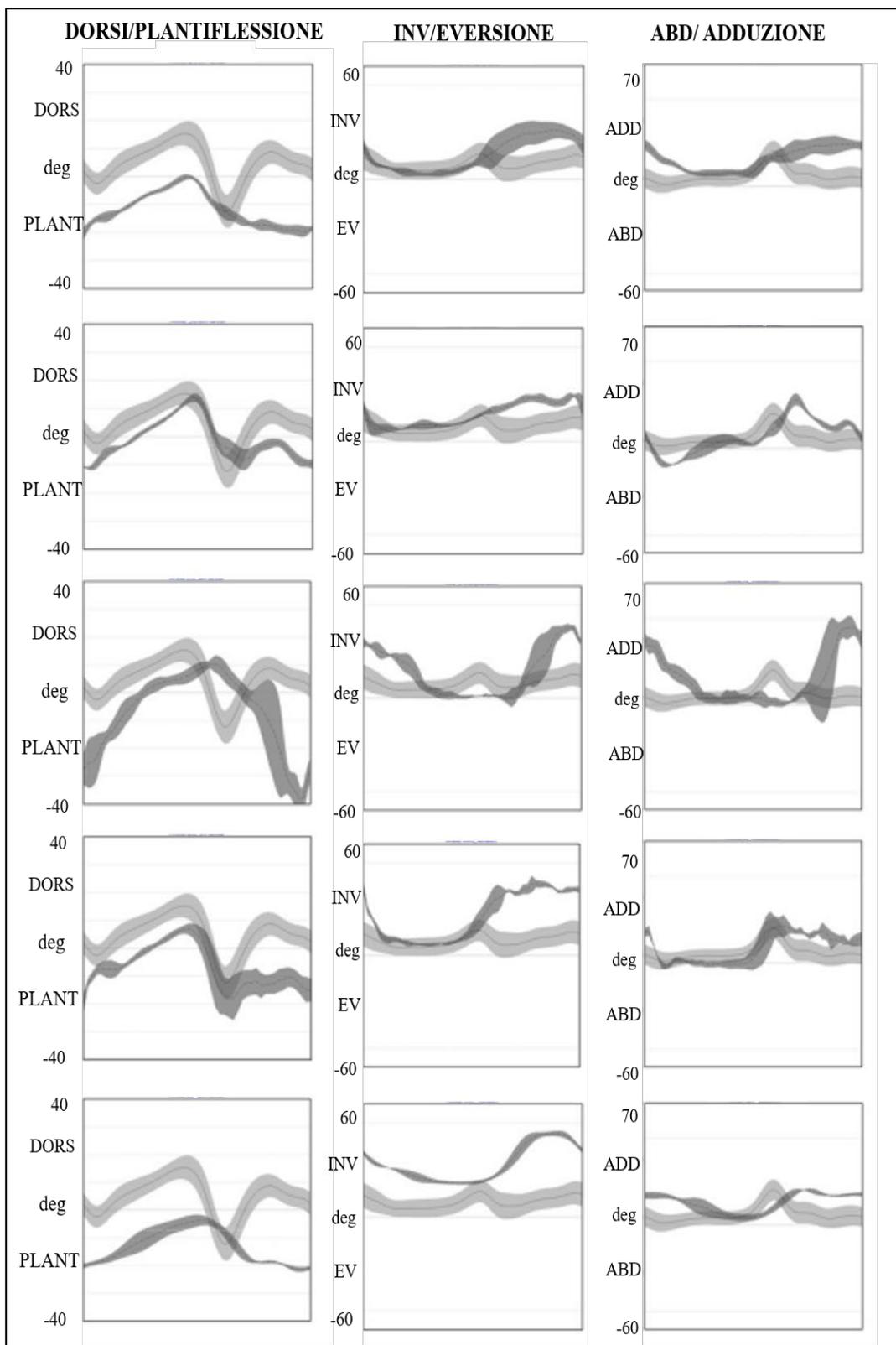


Figura 65. Cinematica articolare della caviglia per cinque pazienti sui tre piani anatomici, in grigio scuro gli andamenti patologici ed in grigio chiaro gli andamenti fisiologici (Benedetti et al., 2011)

	Paziente		Soggetto sano	
	Valore medio	SD	Valore medio	SD
Dorsiflessione al contatto del calcagno [°]	-15,60	13,80	2,56	4,17
Massima plantiflessione in fase di caricamento [°]	-19,16	12,59	-2,64	3,92
Massima dorsiflessione in fase di appoggio [°]	-5,66	14,17	15,89	4,15
Plantiflessione al distacco delle dita [°]	-17,31	13,04	-10,44	5,37
Massima plantiflessione in fase di pendolamento [°]	-25,52	14,52	-13,37	6,02
Massima eversione in fase di appoggio [°]	9,27	15,16	3,13	5,16
Massima inversione in fase di pendolamento [°]	22,53	17,61	3,95	6,36
Massima abduzione in fase di appoggio [°]	9,20	11,25	-0,05	4,47
Massima adduzione in fase di pendolamento [°]	24,95	10,88	20,75	6,25
Rom nel piano sagittale [°]	22,34	12,72	29,36	5,09
Rom nel piano frontale [°]	18,31	10,70	13,83	2,91
Rom nel piano trasversale [°]	21,45	10,59	21,85	4,16

Tabella 3 Valori di alcuni punti significativi della cinematica articolare della caviglia per pazienti con piede equinovaro e per soggetti sani (Benedetti et al., 2011)

4.2 Valutazione dei parametri spazio-temporali per pazienti con piede equinovaro post ictus

Il secondo tipo di valutazione specifica per soggetti che presentano piede equinovaro a seguito di ictus riguarda i parametri spazio temporali. Benedetti et al.(2011) hanno effettuato un confronto tra alcuni parametri spazio-temporali globali acquisiti prima per 15 soggetti con piede equinovaro e poi per 20 soggetti sani, e di questi si riportano il valore medio e la deviazione standard nella **Tabella 4**.

	Paziente		Soggetto sano	
	Valore medio	SD	Valore medio	SD
Durata della fase di appoggio [% del ciclo del cammino]	64,09	8,74	60,31	1,70
Lunghezza del passo [cm]	65,57	25,31	141,17	8,68
Tempo del passo [s]	2,07	0,75	1,11	0,08
Cadenza [passi/minuto]	31,70	8,32	54,34	3,90
Velocità [cm/s]	35,54	17,25	127,80	11,24

Tabella 4 Valore medio e deviazione standard di alcuni parametri spazio temporali globali acquisiti per soggetti sani e per pazienti con piede equinovaro post ictus.(Benedetti et al., 2011)

Più informativo è l'articolo di Gastaldi et al (2014) che fornisce un numero maggiore di parametri spazio temporali e ne monitora l'evoluzione a seguito dell'iniezione di tossina botulinica. Lo studio è stato condotto su 20 pazienti con piede equinovaro post ictus che sono stati valutati prima dell'iniezione della tossina e poi a distanza di 30, 60, 90 e 120 giorni. In aggiunta ai parametri spazio-temporali globali citati nello studio precedente (con cui valori del pre-iniezione risultano concordi), sono stati aggiunti per il solo arto patologico: la percentuale del ciclo del passo speso in singolo supporto (21,88 con range di 26,60), la percentuale del ciclo del passo speso in doppio supporto (42,23 con range di 38,20) e Limp index (0,82 con range di 0,33), quest'ultimo definito come il rapporto tra il tempo di supporto singolo dell'arto patologico e quello dell'arto controlaterale. Gli autori hanno evidenziato come, grazie all'effetto della tossina botulinica, nei quattro mesi seguenti all'iniezione ci siano stati: un incremento nella velocità del cammino, una diminuzione del tempo del passo, un aumento del tempo speso in singolo supporto per l'arto patologico, una diminuzione del tempo speso in doppio supporto per l'arto patologico ed una normalizzazione della durata di tutte le fasi del cammino. Si riportano in **Figura 66**. gli andamenti dei parametri appena citati.

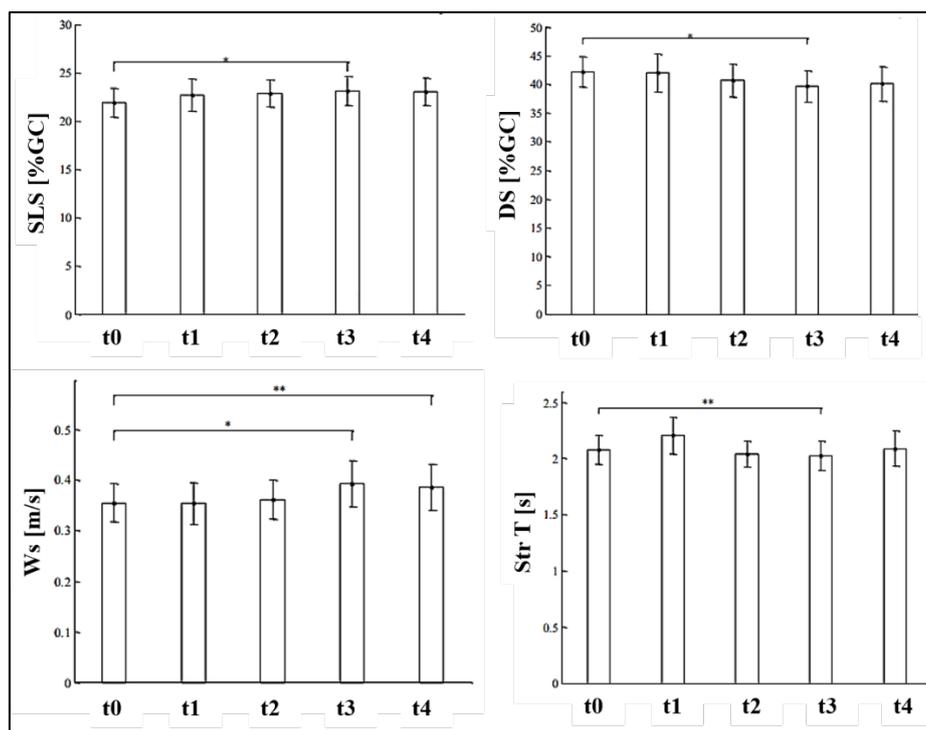


Figura 66. Evoluzione di alcuni parametri spazio temporali a seguito dell'iniezione di tossina botulinica. SLS: singolo supporto per l'arto patologico, DS: doppio supporto per l'arto patologico, Ws: velocità globale del cammino, Str: tempo del passo globale. T0, t1, t2, t3 e t4 corrispondono rispettivamente a: pre iniezione e 30, 60, 90 e 120 giorni dall'iniezione. (Gastaldi et al., 2015)

Un'ulteriore valutazione dell'efficacia della tossina botulinica mediante parametri spazio temporali è riportata nell'articolo di Aktürk et al., (2018), per il quale è stata valutata, per 25 pazienti, la distanza massima che questi fossero in grado di percorrere in sei minuti, e la sua eventuale evoluzione a distanza di quattro e dodici settimane dall'iniezione di tossina botulinica. I valori ottenuti, partendo dal pre-iniezione, sono: 54.7 ± 22.2 m, 58.2 ± 21.8 m, 64.5 ± 22.5 m. Gli autori hanno quindi evidenziato come il miglioramento più marcato si abbia tra la quarta e la dodicesima settimana post iniezione.

4.3 Valutazione del segnale EMG per pazienti con piede equinovaro post ictus

In riferimento all'attività muscolare, Hesse et al. (1996) hanno valutato gli effetti dell'iniezione di tossina botulinica sul soleo di nove pazienti affetti da spasticità con piede equinovaro. Gli autori hanno inizialmente osservato come i pazienti mostrassero una attivazione del soleo durante la parte finale del pendolamento, la quale, facendo riferimento alla **Figura 45**, risulta essere non fisiologica. A distanza di quattro settimane dall'iniezione di tossina botulinica è stata osservata una diminuzione di questa attività, come mostrato nella **Figura 67.**, la quale rappresenta l'attività del soleo prima (linea tratteggiata) e dopo (linea continua) l'iniezione.

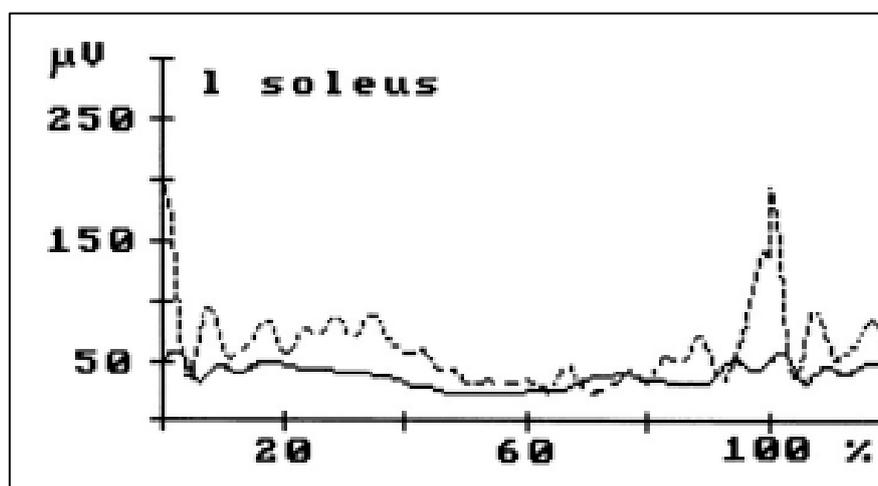


Figura 67. Confronto tra l'attività del soleo pre iniezione (linea tratteggiata) e post iniezione (linea continua) di tossina botulinica (Hesse et al., 1996)

Tang et al. (2012) hanno successivamente osservato come, a seguito dell'iniezione di tossina botulinica in uno dei muscoli plantiflessori di 15 pazienti con piede equinovaro, per cinque di essi che non mostravano alcuna dorsiflessione prima dell'iniezione, ci fosse una attivazione del tibiale anteriore (muscolo dorsiflessorio) a seguito dell'iniezione (a

distanza di 8 e 12 settimane). Secondo gli autori questo è dovuto alla minore inibizione dell'azione del tibiale anteriore esercitata dal muscolo plantiflessorio, la quale è stata indotta dalla tossina botulinica.

Campanini et al.(2020) hanno invece riassunto i principali pattern del segnale EMG, mostrati da pazienti con piede equinovaro, per alcuni muscoli coinvolti nel cammino. I muscoli in questione sono: soleo, tibiale anteriore, estensore lungo delle dita, flessore lungo delle dita, flessore lungo dell'alluce, ed estensore lungo delle dita. Il primo muscolo che gli autori ritengono presenti anomalie è il tibiale anteriore, del quale hanno osservato una assenza di attività durante le fasi di caricamento e pre-pendolamento, fasi nelle quali fisiologicamente dovrebbe essere attivo, ed una attività alterata rispetto al normale durante l'ultima parte della fase di appoggio. Per quanto riguarda il flessore lungo delle dita ed il flessore lungo dell'alluce, di questi si sono registrate: un'attivazione prematura durante il caricamento ed un'attivazione prolungata durante il pre pendolamento. Infine, per l'estensore lungo delle dita, si è osservata una totale assenza di attività sia durante le fasi di caricamento e pre-pendolamento che durante l'intera fase di pendolamento. Gli autori hanno anche fornito una giustificazione per i pattern osservati, in particolare: le attivazioni premature o che avvengono in fasi diverse dal fisiologico, sono da attribuire all'iper attività del muscolo, mentre per i muscoli che non mostrano attività durante le fasi in cui fisiologicamente dovrebbero attivarsi, questo può essere attribuito alla debolezza muscolare.

Per quanto riguarda invece il soleo, di questo si sono osservati due diversi pattern, in dipendenza dalla iper-attività o dalla eccessiva rigidità del muscolo stesso. Nel caso di iper-attività, si sono registrate: un'attivazione prematura durante il caricamento, un'attivazione prolungata durante il pre pendolamento ed un'attivazione durante la fase di pendolamento. Tutte e tre le attivazioni citate non sono fisiologiche, come si può vedere prendendo a riferimento la **Figura 45**, dalla quale si vede come per un soggetto sano il soleo dovrebbe attivarsi alla fine del caricamento e disattivarsi prima della fase di pre-pendolamento. Nel caso di muscolo eccessivamente rigido invece, si è osservata un'attività continua ma molto ridotta (o addirittura nulla) sia in fase di appoggio che in fase di pendolamento.

4.4 Valutazioni effettuate mediante pedane di forza per pazienti con piede equinovaro post ictus

Bensoussan et al. (2006) hanno condotto uno studio su due gruppi di soggetti, il primo composto da tre pazienti con piede equinovaro post-ictus ed il secondo da tre pazienti

sani. Ad entrambi i gruppi è stato chiesto inizialmente di rimanere fermi poggiando i piedi su due pedane di forza, e successivamente di camminare iniziando il ciclo del passo con un arto a loro scelta. Il primo obiettivo dello studio era quello di analizzare l'andamento delle componenti della reazione vincolare, mostrate in **Figura 68**, durante le sottofasi P1, P2 e P3 in cui è stato diviso il tempo che intercorre tra, il momento in cui il paziente si trova ancora in doppio supporto ed il contatto iniziale del calcagno. Le tre fasi sono mostrate in **Figura 69**.

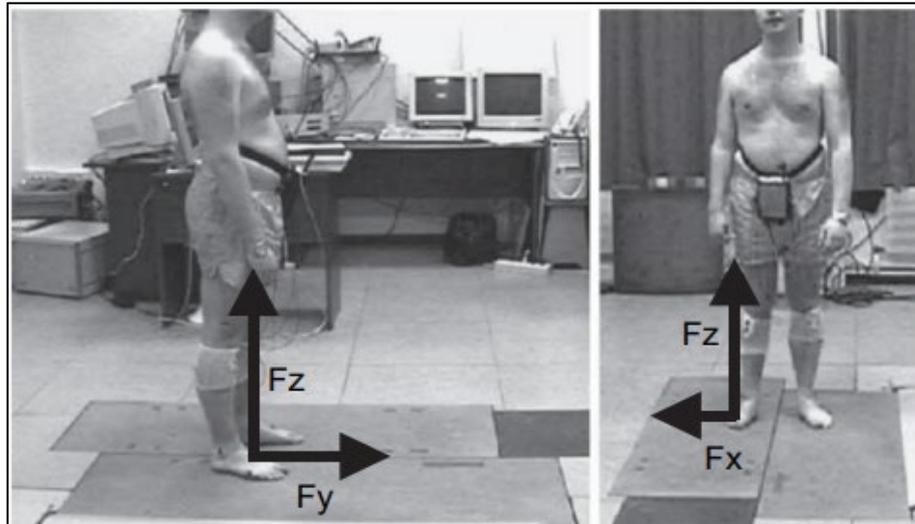


Figura 68. Le componenti della reazione piede terreno, con F_y è indicata la componente anteroposteriore (Bensoussan et al., 2006)

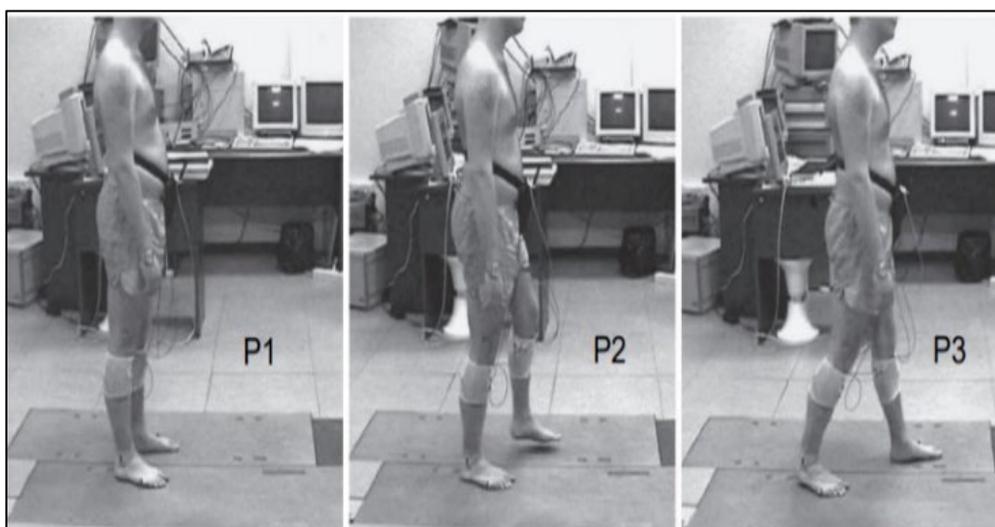


Figura 69. Sottofasi in cui è stato diviso il tempo che intercorre tra il momento in cui il paziente si trova ancora in doppio supporto ed il contatto iniziale del calcagno (Bensoussan et al., 2006)

La prima differenza che è stata notata tra i due gruppi riguarda l'andamento della componente antero-posteriore della forza di reazione scambiata tra il piede ed il terreno, indicata con F_y in **Figura 68**. Questa forza, quando esercitata dal piede opposto a quello che effettuerà il primo contatto, viene considerata come rappresentativa dell'accelerazione lineare del centro di gravità nel piano sagittale. Confrontando l'andamento di F_y per soggetti sani e soggetti patologici si è visto come in questi ultimi, quando esercitata dall'arto patologico, essa risulti negativa durante la fase P1, a differenza di entrambi gli arti dei soggetti sani, per i quali è positiva. Inoltre durante la fase P3, nonostante l'andamento non sia del tutto opposto a quello dei soggetti sani, la forza risulta comunque essere minore di quella esercitata da entrambi gli arti di questi ultimi. Gli andamenti della forza F_y durante le tre fasi per i soggetti patologici e per i soggetti sani sono riportati rispettivamente nelle **Figura 70** **Figura 71**.

Alla luce di questi risultati, gli autori hanno concluso che: l'arto patologico durante la fase P1 esercita una forza retropulsiva, mentre quella esercitata dai soggetti sani risulta propulsiva, e inoltre, sempre per l'arto patologico, l'ultima fase è caratterizzata da una generale mancanza di propulsione.

Un'ulteriore differenza si è osservata nella durata delle fasi P1, P2 e P3, in relazione all'arto che inizia la deambulazione, in particolare per i pazienti si è visto come nel caso in cui sia l'arto sano ad effettuare il contatto iniziale, la fase P1 risulti più lunga e la P2 più corta, rispetto a quando è l'arto patologico ad iniziare il cammino.

Nei soggetti sani la durata delle tre fasi si mantiene uguale indipendentemente da quale sia l'arto con cui si inizia la deambulazione

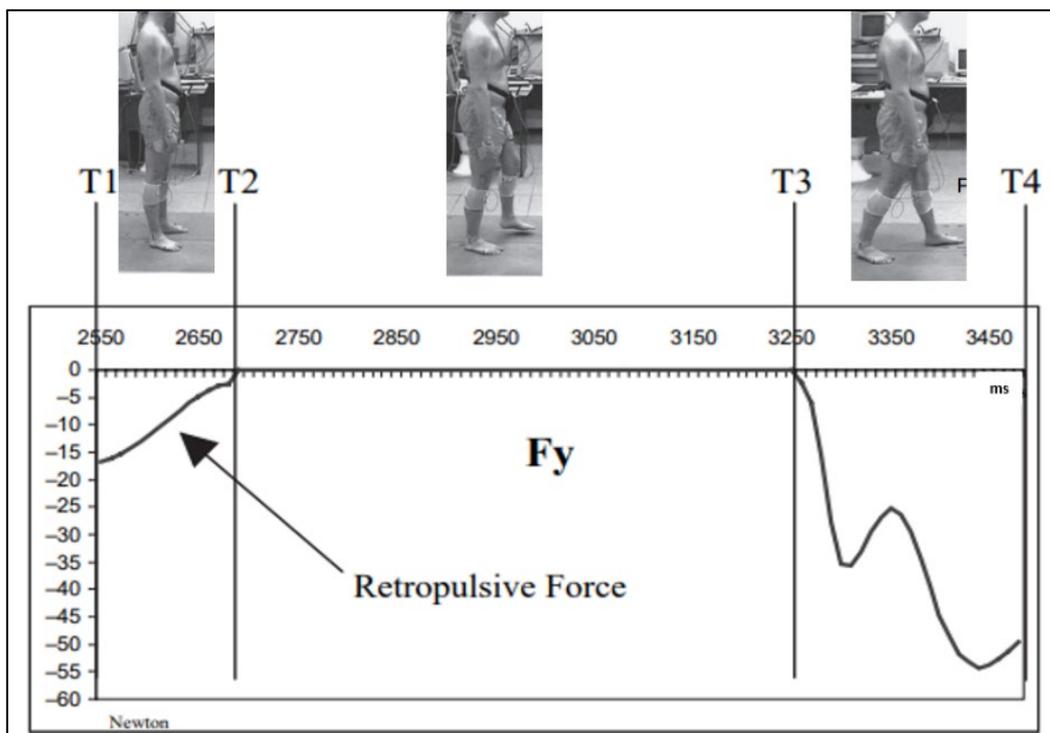


Figura 70. Andamento della componente antero-posteriore della reazione piede-terreno per arto patologico, durante le tre sottofasi che precedono il contatto iniziale (Bensoussan et al., 2006).

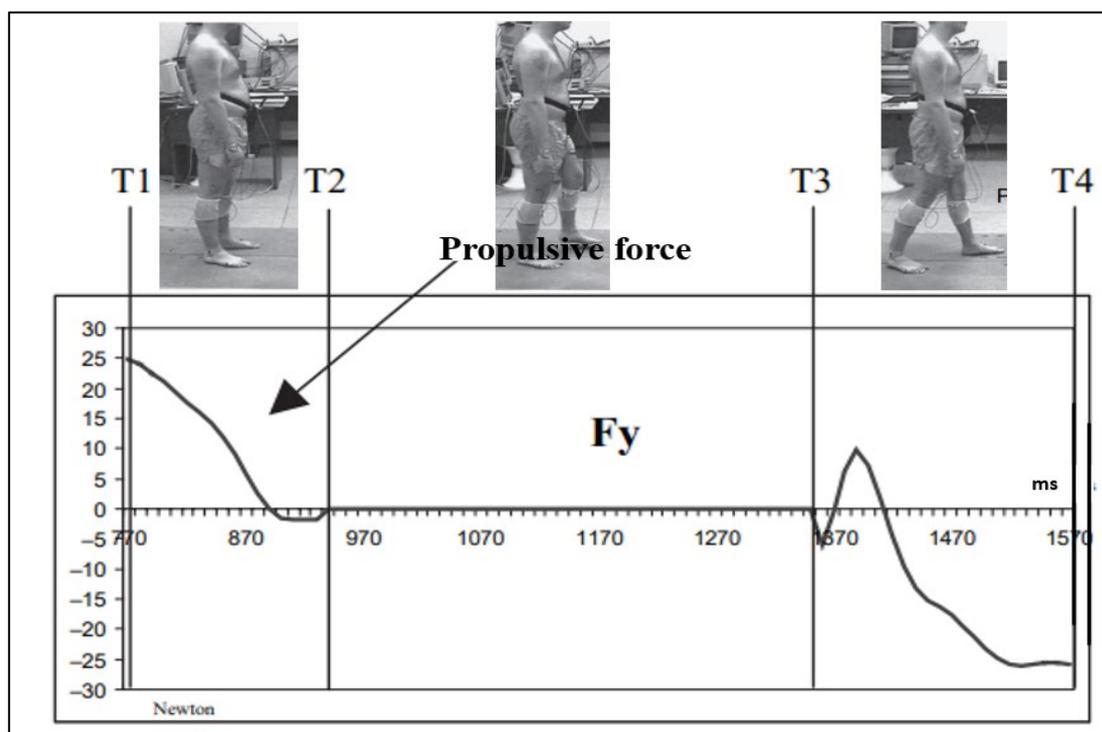


Figura 71. Andamento della componente antero-posteriore della reazione piede-terreno per arto sano, durante le tre sottofasi che precedono il contatto iniziale (Bensoussan et al., 2006).

Sempre all'interno di questo studio, due ulteriori valutazioni hanno rivelato altre differenze tra pazienti e soggetti sani. La prima differenza riguarda la distribuzione del peso corporeo: si è visto come i pazienti tendano a caricare maggiormente l'arto sano, mentre per i soggetti sani la distribuzione del peso risulta simmetrica tra i due arti. Per quanto riguarda il centro di pressione (COP), ossia il punto di applicazione della risultante delle forze scambiate tra piede e terreno, si è invece osservato che nel piano sagittale, quando il contatto iniziale avviene per mezzo dell'arto patologico, il COP compie uno spostamento verso dietro, il quale non si verifica né per i soggetti sani né, nel caso del paziente stesso, se il contatto iniziale avviene per mezzo dell'arto non patologico.

4.5 Valutazioni cliniche per pazienti con piede equinovaro post ictus

Tang et al. (2012) hanno valutato l'effetto dell'iniezione di tossina botulinica per pazienti con piede equinovaro post-ictus mediante il punteggio MAS (Modified Ashworth scale) per il muscolo trattato e il punteggio Fugl–Meyer per l'arto patologico. La scala MAS prevede un punteggio da 0 a 5, dove 0 indica che non vi è aumento del tono muscolare e 5 indica che vi è un importante aumento di tono muscolare. La scala Fugl Meyer invece prevede per l'arto inferiore un punteggio massimo di 34 e valuta una serie di attività assegnando un punteggio da 0 a 2, dove 0 indica che il paziente non riesce a svolgere l'attività e 2 indica che il paziente riesce a svolgerla completamente. Il punteggio finale è dato dalla somma dei singoli punteggi. Si è evidenziato come, nel caso del MAS, vi siano stati dei cambiamenti significativi tra il pre-iniezione ($3.3 + 1.3$ [media + SD]) e la quarta settimana post iniezione ($2.1 + 1.0$ [media + SD]). Per quanto riguarda il punteggio Fugl–Meyer per l'arto patologico, questo non è aumentato significativamente rispetto al pre-iniezione ($22.5 + 4.9$ [media + SD]) fino alla dodicesima settimana post iniezione ($24.5 + 3.5$ [media + SD]).

Gastaldi et al. (2015) hanno monitorato, per 20 pazienti con piede equinovaro che hanno ricevuto un'iniezione di tossina botulinica, i punteggi delle scale MAS, BBS (Berg balance scale) e RMI (Rivermead Mobility Index). La Berg Balance Scale o BBS, valuta l'equilibrio del paziente con un punteggio che va da 0 a 56: un punteggio minore di 40 indica che vi è rischio di caduta. Il Rivermead Mobility Index è un indice utilizzato per la valutazione delle performance motorie che può assumere un valore minimo di 0 ed un valore massimo di 15: maggiore è il punteggio e migliori sono le performance motorie del paziente. Dai risultati ottenuti a distanza di 30, 60, 90 e 120 giorni dall'iniezione di tossina botulinica, non sono stati riscontrati cambiamenti significativi in nessuno dei tre

indici sopracitati. È opinione degli autori che variazioni così piccole della spasticità non possano essere identificate mediante scale cliniche, ma sia necessaria una valutazione di tipo strumentale.

Aktürk et al. (2018) hanno valutato l'effetto della tossina botulinica su 23 pazienti con piede equinovaro post ictus mediante il punteggio MAS ed il punteggio FAS (Functional ambulation scale). La FAS valuta la capacità di camminare, ed assegna al paziente un punteggio da 0 a 5 dove 0 indica completa incapacità nel camminare mentre 5 indica che il paziente riesce a camminare liberamente. Si è visto come, a seguito della valutazione pre iniezione (MAS=2.69 ± 0.55, FAS=2), si siano verificati dei cambiamenti significativi in tutti e due i punteggi in corrispondenza della dodicesima settimana post iniezione (MAS=1.69 ± 0.47, FAS=3), con una diminuzione del MAS ed un aumento del FAS.

Capitolo 5

Analisi del cammino pre- iniezione di tossina botulinica

Lo studio di Gastaldi et al. (2015) ha fornito i dati relativi alla cinematica articolare e ai parametri spazio temporali del cammino per sei pazienti post ictus con piede equinovaro. I dati in questione sono stati acquisiti prima dell'iniezione di tossina botulinica e poi a distanza di 30, 60 90 e 120 giorni. I dati riguardanti la cinematica di anca, ginocchio e caviglia prima dell'iniezione sono stati rappresentati mediante il software Matlab e riportati in questo capitolo, evidenziandone le principali differenze rispetto agli andamenti fisiologici. I parametri spazio temporali acquisiti prima dell'iniezione di tossina botulinica sono stati anch'essi riportati e confrontati con valori di riferimento provenienti dalla letteratura.

5.1 Materiali e metodi

Gastaldi et al., nel loro studio del 2015 intitolato “Effects of botulinum neurotoxin on spatio-temporal gait parameters of patients with chronic stroke: a prospective open-label study” hanno valutato gli effetti della tossina botulinica sui parametri spazio temporali acquisiti mediante analisi del cammino, per 20 pazienti post-ictus con piede equinovaro. I criteri di inclusione per questo studio erano: ictus avvenuto più di sei mesi prima; spasticità e piede equinovaro ($MAS > 1$); eventuale ultimo trattamento con tossina botulinica effettuato almeno cinque mesi prima; età compresa tra i 18 e i 75 anni; abilità di camminare per 10 m con o senza assistenza; durata della spasticità maggiore di quattro mesi e condizione di plantiflessione ed inversione durante la fase di pendolamento. Ogni paziente ha ricevuto un inoculo di tossina botulinica in uno tra i seguenti muscoli: gastrocnemio mediale e laterale, soleo, tibiale anteriore e posteriore, flessore lungo delle dita e flessore lungo dell'alluce. I punti di iniezione per muscolo (da uno a tre) e la dose di tossina botulinica (da 200U a 400U) sono stati valutati di volta in volta per il singolo paziente.

Sono state effettuate da una a cinque analisi del cammino, in base alla disponibilità dei pazienti, rispettivamente: prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30 (visita 1), 60 (visita 2), 90 (visita 3) e 120 giorni (visita 4). Per ciascuna analisi i pazienti hanno camminato in linea retta, alla loro velocità più confortevole, eseguendo un minimo di quattro prove, ciascuna di 10-12 passi. Mediante l'utilizzo del sistema Vicon 460 e di sei telecamere con frequenza a 100 Hz è stato possibile acquisire, per ogni analisi, i seguenti parametri spazio temporali globali: velocità [m/s], lunghezza del passo [m], cadenza [passi/s], tempo del passo [s] e larghezza del passo [m]. Ulteriormente, per il singolo arto sono stati acquisiti: tempo speso in singolo supporto [% ciclo del passo], tempo speso in doppio supporto [% ciclo del passo] e Limp index.

Per un numero minore di pazienti, è stato possibile acquisire anche i dati riguardanti la cinematica articolare di anca, ginocchio e caviglia nel piano sagittale e della sola caviglia nei piani frontale e trasversale, e processarle mediante il software "Nexus". In particolare: per quattro dei sei pazienti sono stati acquisiti i suddetti dati in corrispondenza di tutte le visite, mentre per due di essi solo in corrispondenza delle visite 0, 1, 2, e 4. Per la caviglia si riporta in **Figura 72** una rappresentazione dei movimenti nei tre piani, mentre per anca e ginocchio i movimenti nel piano sagittale sono visibili nelle **Figure 41, 42 e 43**.

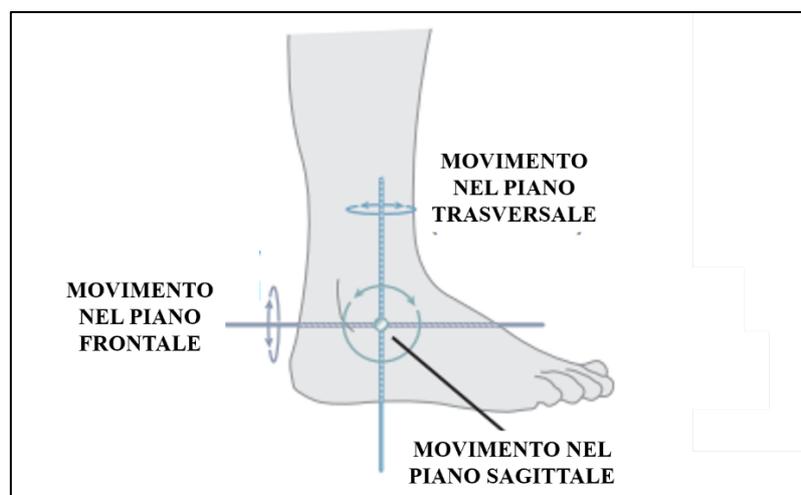


Figura 72. Movimenti della caviglia nei tre piani (Neumann, 2013)

Si riportano in **Tabella 5** i dati relativi ai sei pazienti sopracitati.

All'interno di questo lavoro di tesi, per questi sei pazienti, sono state rappresentate le curve cinematiche di anca, ginocchio e caviglia (quest'ultima in tutti e tre i piani), come media delle acquisizioni per ogni visita, mediante il software Matlab. Le curve sono state utilizzate inizialmente per poter evidenziare le principali differenze tra la cinematica di pazienti con piede equinovaro e quella di soggetti sani (confrontando le curve dei pazienti con andamenti fisiologici pubblicati in letteratura), ed in seguito per stabilire se e come

queste differenze fossero influenzate dall'azione della tossina botulinica. Lo stesso tipo di lavoro è stato eseguito sui parametri spazio temporali, ed infine si è cercato di capire se vi fossero correlazioni tra l'evoluzione di questi ultimi e quella dei parametri cinematici a seguito dell'iniezione.

ID paziente	Genere	Età	Patologia	Deformità
M01	Maschile	27	Emiparesi e afasia	Equino medio, recurvato grave, inversione lieve Pattern atipico
M02	Maschile	65	Emiparesi spastica	Equino grave, recurvato medio
M03	Maschile	63	Emiparesi	Equino medio
M04	Maschile	57	Emiparesi spastica	Equino grave
M05	Maschile	37	Emiplegia	Equino medio
F01	Femminile	58	Emiparesi spastica	Equino medio, recurvato lieve, inversione

Tabella 5. Dati relativi a 6 dei 20 soggetti studiati da Gastaldi et al., 2015

5.2 Analisi della cinematica articolare pre iniezione di tossina botulinica

Per i sei pazienti citati nel precedente paragrafo si riportano, nelle **Figure 73, 74, 75, 76 e 77**, la cinematica articolare di anca ginocchio e caviglia per entrambi gli arti, acquisite nel corso della visita 0, sul piano sagittale. In tutte le figure, con la linea continua in rosso viene rappresentato l'andamento medio delle prove acquisite durante la singola visita, mentre con la fascia la sua deviazione standard. La linea verticale in rosso indica la percentuale del ciclo del passo alla quale si verifica il passaggio da fase di appoggio a fase di pendolamento. In grigio è rappresentato l'andamento fisiologico.

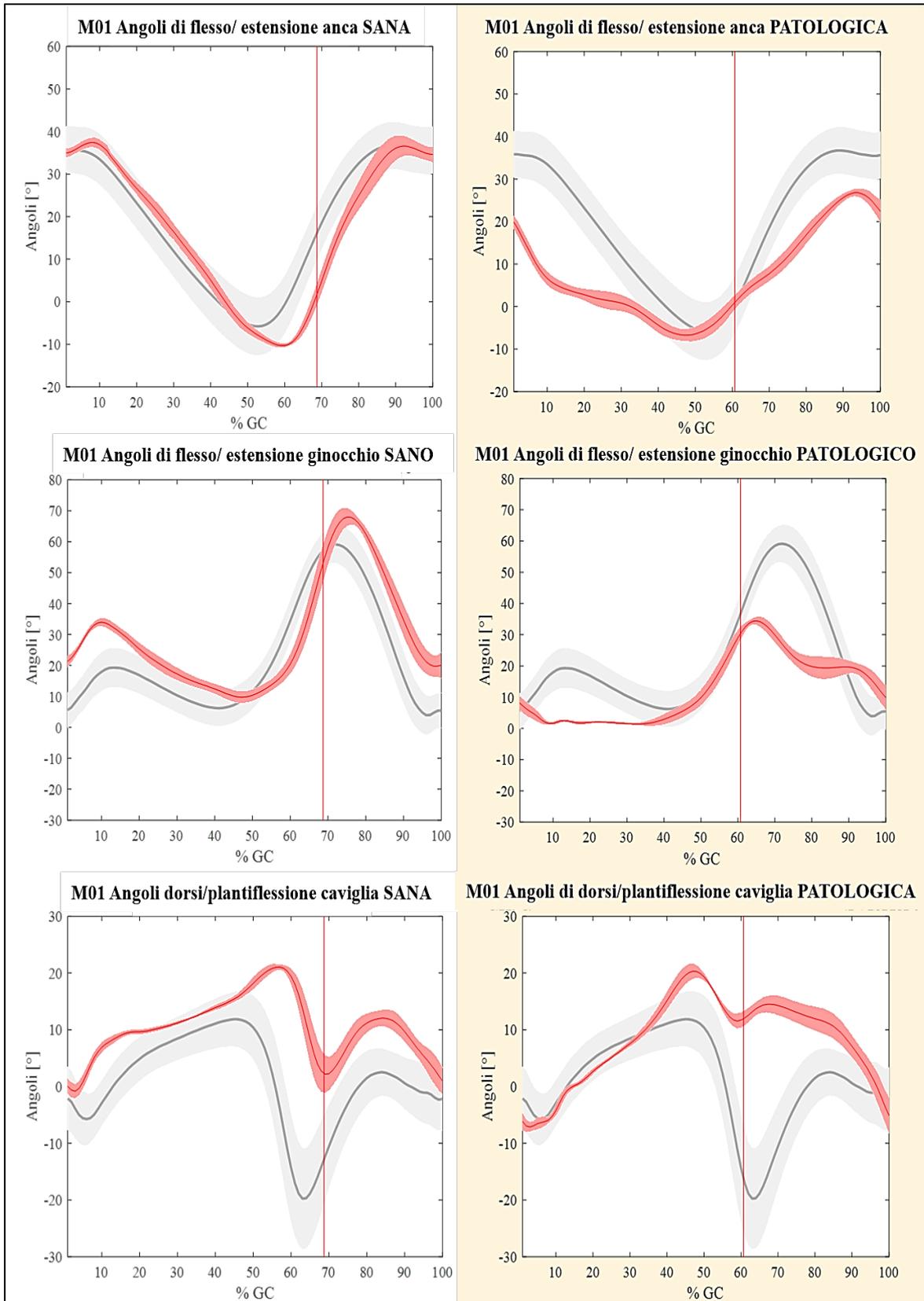


Figura 73. Cinematica articolare di anca, ginocchio e caviglia nel piano sagittale per entrambi gli arti di M01, prima dell'iniezione di tossina botulinica.

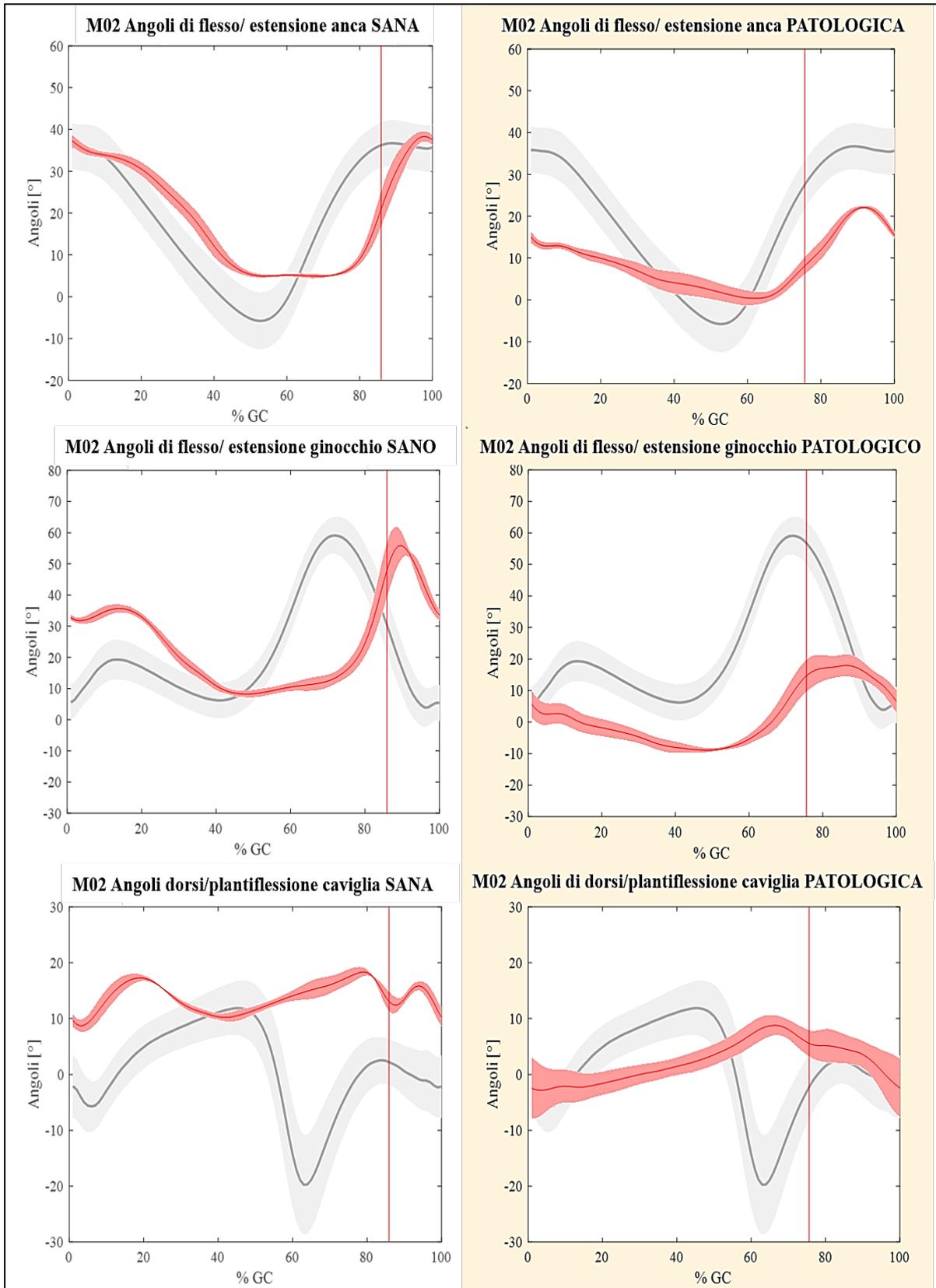


Figura 74. Cinematica articolare di anca, ginocchio e caviglia nel piano sagittale per entrambi gli arti di M02, prima dell'iniezione di tossina botulinica.

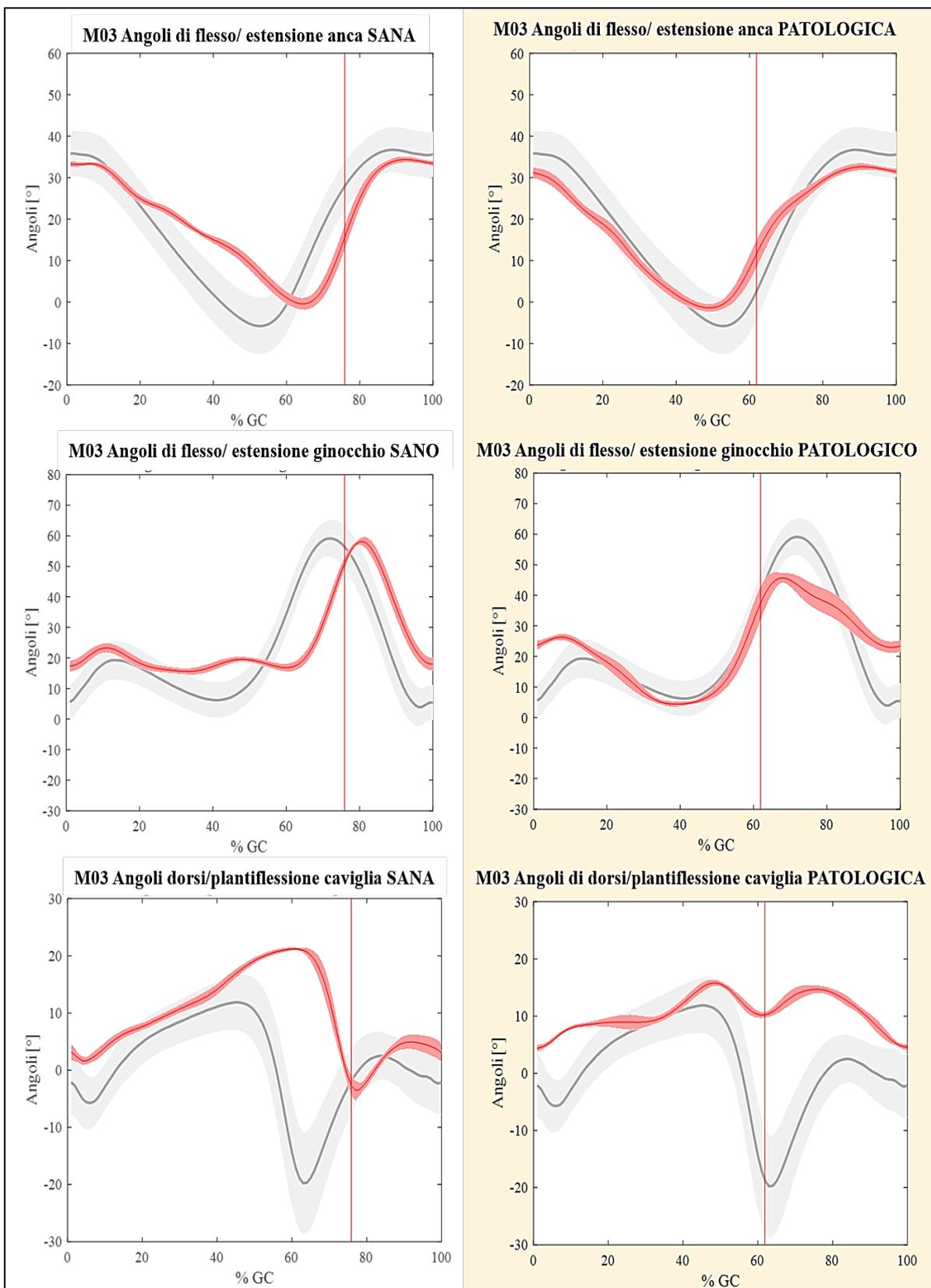


Figura 75 Cinematica articolare di anca, ginocchio e caviglia nel piano sagittale per entrambi gli arti di M03, prima dell'iniezione di tossina botulinica.

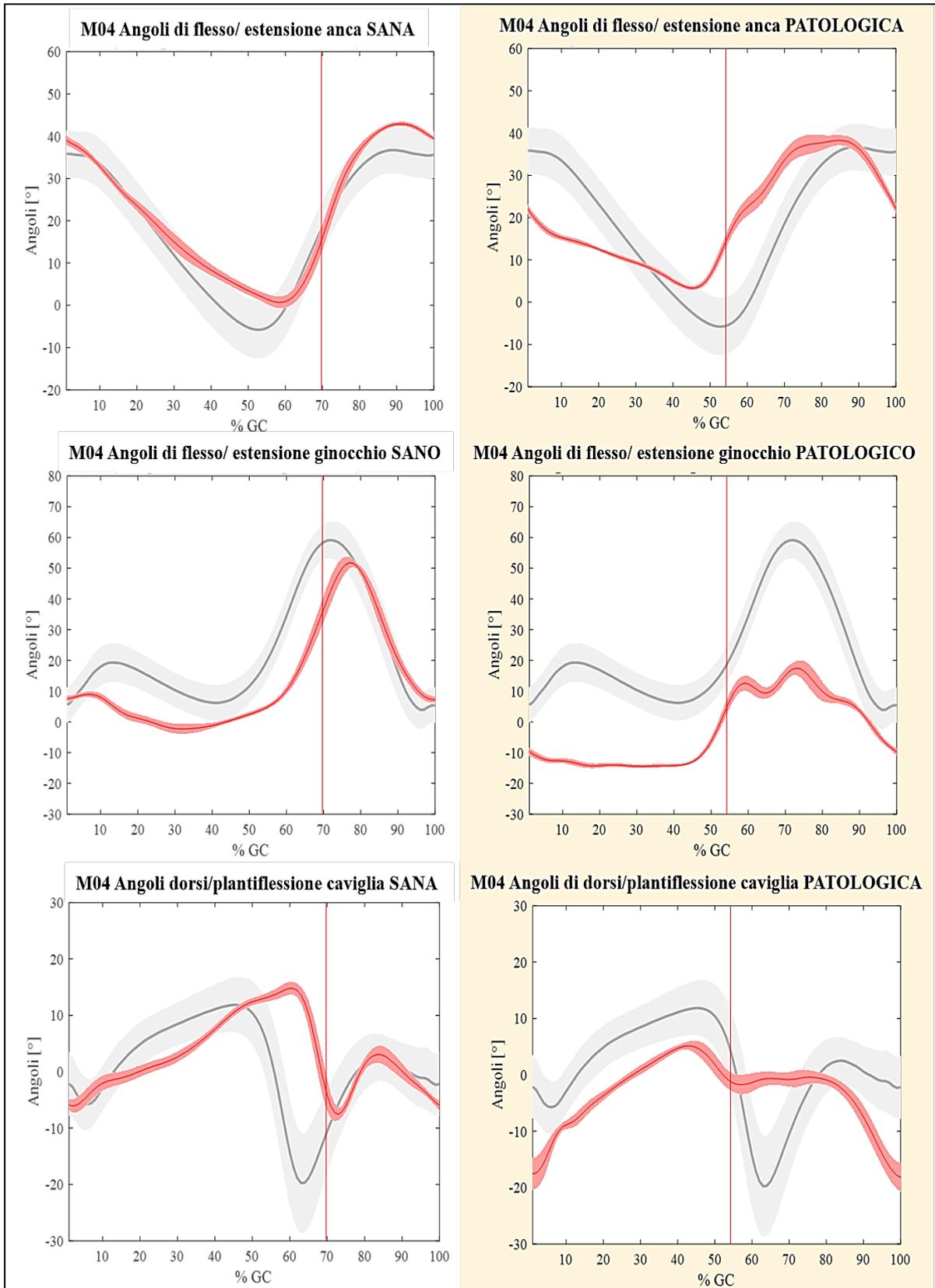


Figura 76. Cinematica articolare di anca, ginocchio e caviglia nel piano sagittale per entrambi gli arti di M04, prima dell'iniezione di tossina botulinica.

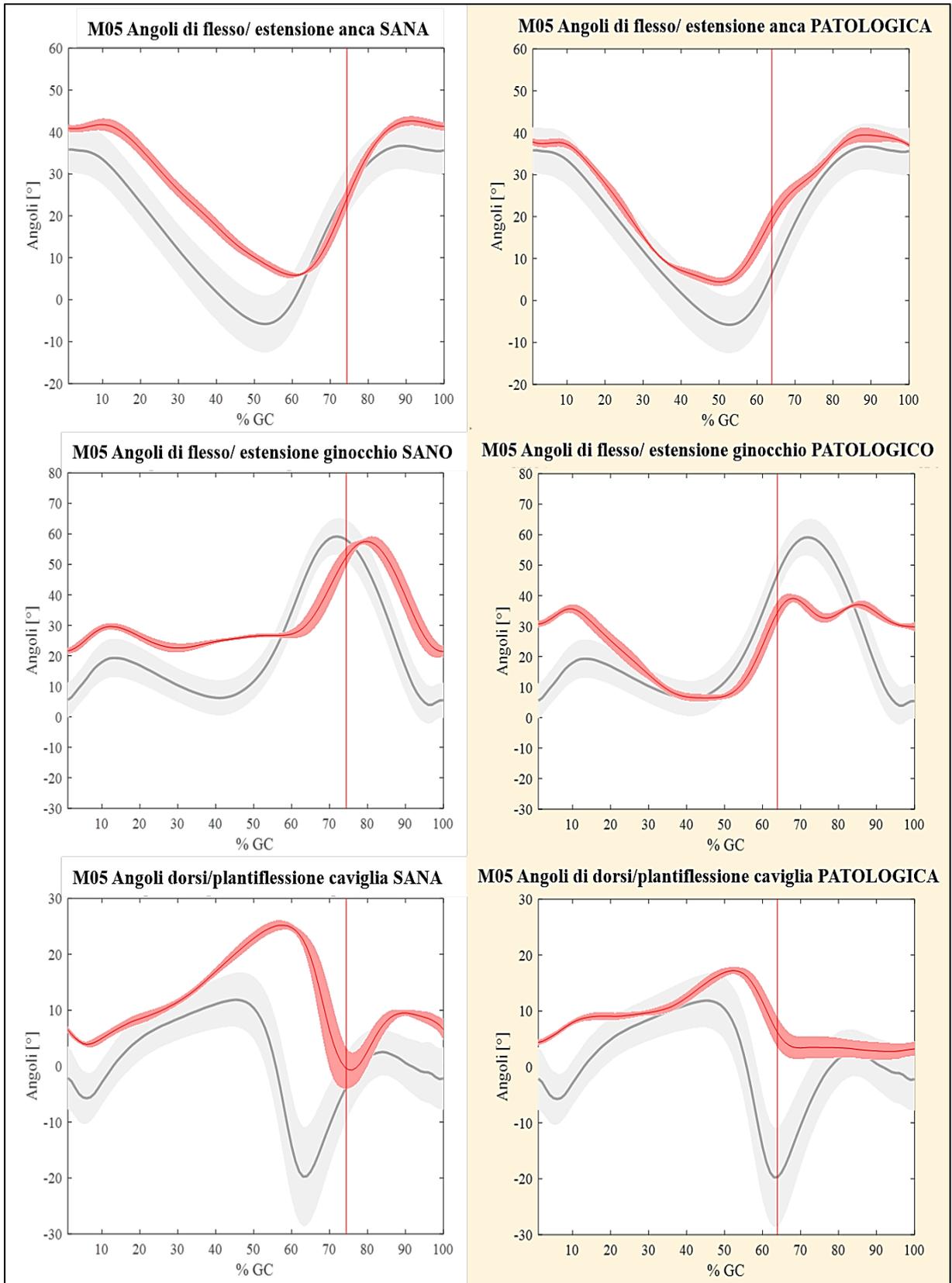


Figura 77. Cinematica articolare di anca, ginocchio e caviglia nel piano sagittale per entrambi gli arti di M05, prima dell'iniezione di tossina botulinica.

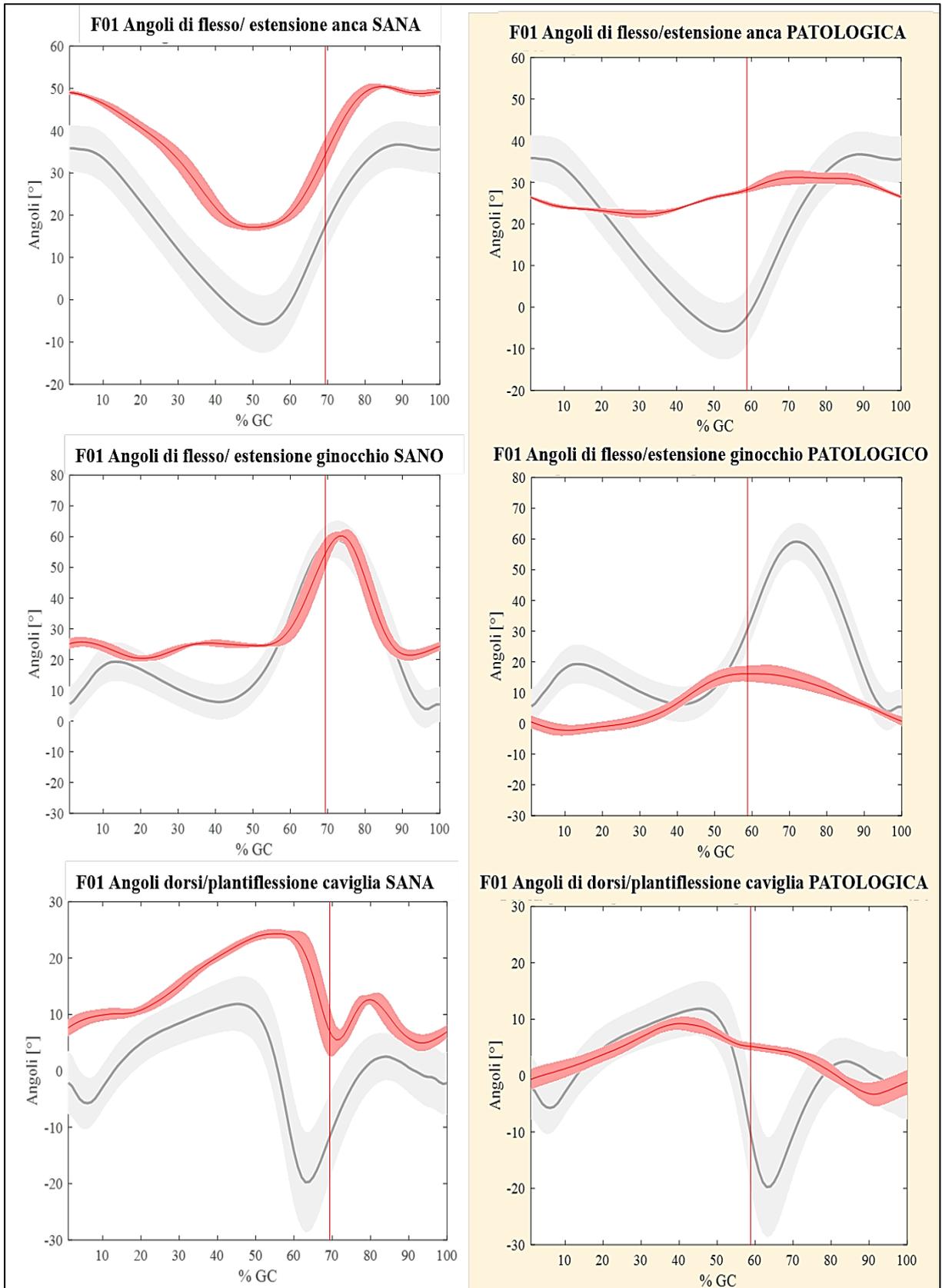


Figura 78. Cinematica articolare di anca, ginocchio e caviglia nel piano sagittale per entrambi gli arti di F01, prima dell'iniezione di tossina botulinica.

La prima differenza che si può notare sul piano sagittale riguarda i valori raggiunti dai punti significativi delle curve, i quali sono evidenziati nelle **Figure 79 e 80**. Con “picchi” in questo caso s’intende i valori massimi e minimi di flessione ed estensione raggiunti durante le fasi di appoggio e pendolamento.

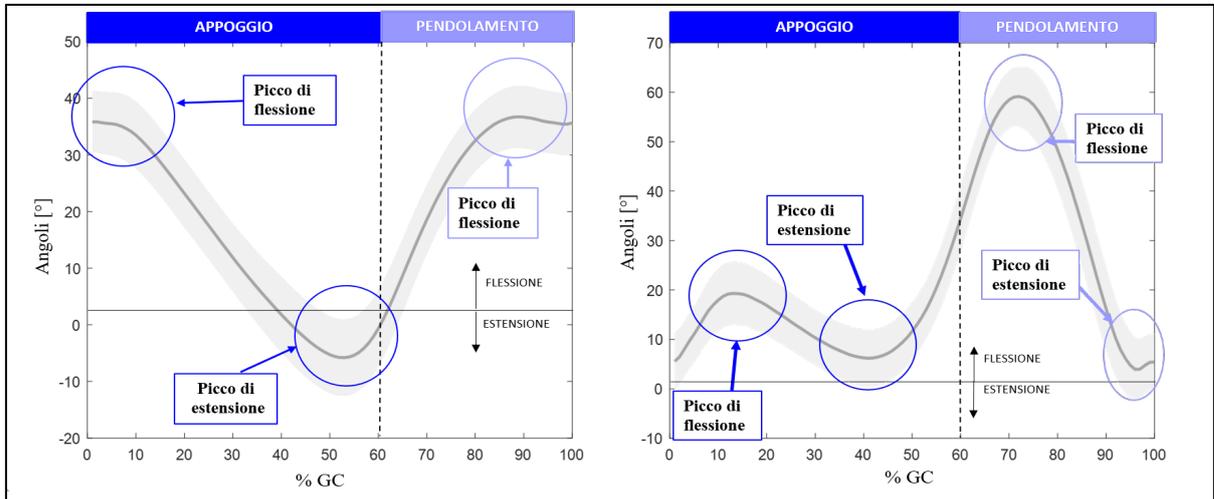


Figura 79: Punti significativi delle curve cinematiche di anca e ginocchio

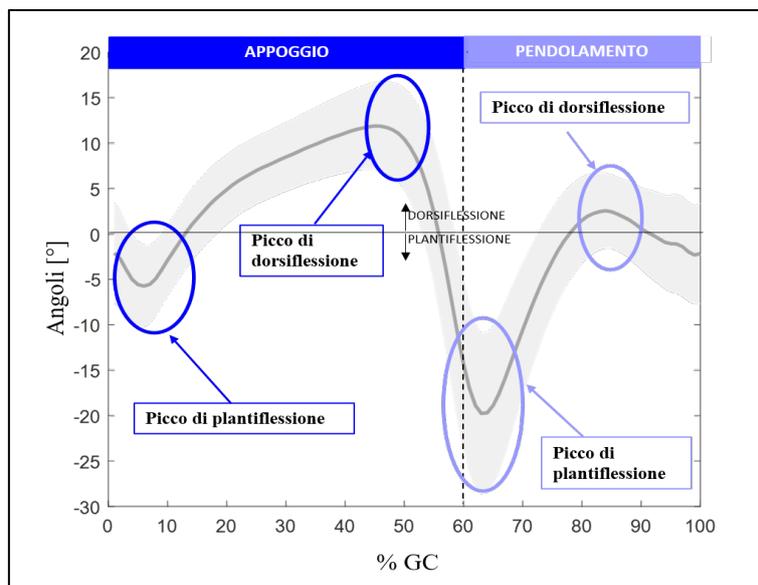


Figura 80 Punti significativi della curva cinematica della caviglia

In riferimento all'anca patologica, le principali differenze rispetto al fisiologico riguardano i pazienti M01, M02, M04 ed F01 che presentano un picco di flessione in appoggio al di fuori del range fisiologico e posizionato più basso di esso (**Figure 73, 74, 76, 78**); il picco di estensione in appoggio dei pazienti F01, M04 ed M05, che si trova posizionato più in alto del range fisiologico (**Figure 76, 77, 78**); ed il picco di flessione in pendolamento dei pazienti M01 ed M02 che si trova al di sotto del range fisiologico

(Figure 73 e 74). Si riportano i valori dei punti significativi per l'anca patologica di tutti i pazienti in **Tabella 6**.

ID paziente	Picco di flessione in appoggio [°]	Picco di estensione in appoggio [°]	Picco di flessione in pendolamento [°]
M01	19,8 ± 1,5	-6,7 ± 1,3	26,8 ± 1,0
M02	15 ± 1,3	0,4 ± 1,5	22,1 ± 0,3
M03	31,2 ± 1,3	-1,4 ± 0,9	32,7 ± 0,8
M04	22,0 ± 1,0	3,3 ± 0,5	38,3 ± 1,4
M05	37,8 ± 0,9	4,4 ± 1,0	39,5 ± 1,7
F01	26,4 ± 0,3	22,4 ± 1,0	31,2 ± 1,7
Fisiologico	35,8	-5,8	36,7

Tabella 6 Valori dei punti significativi della cinematica dell'anca patologica riportati come media ± deviazione standard.

In riferimento all'anca sana invece, per i pazienti M01, M03 ed M04 tutti i picchi significativi si trovano all'interno del range fisiologico (**Figure 73, 75 e 76**) mentre il solo picco di estensione in appoggio risulta al di sopra di esso per i pazienti M02 ed M05 (**Figure 74 e 77**). Per F01 la curva risulta spostata totalmente verso l'alto, e quindi tutti e tre i picchi risultano avere valori al di fuori del range fisiologico (**Figura 78**). Si riportano i valori dei punti significativi per l'anca sana di tutti i pazienti in **Tabella 7**.

ID paziente	Picco di flessione in appoggio [°]	Picco di estensione in appoggio [°]	Picco di flessione in pendolamento [°]
M01	37,5 ± 1,1	10,3 ± 0,5	36,6 ± 2,3
M02	37,3 ± 1,4	4,9 ± 0,2	38,3 ± 1,2
M03	33,4 ± 0,4	-0,5 ± 1,4	34,4 ± 0,7
M04	39,0 ± 1,2	0,7 ± 1,4	42,9 ± 0,5
M05	41,8 ± 1,1	5,8 ± 0,6	42,6 ± 1,1
F01	49,0 ± 0,5	17,1 ± 0,7	50,4 ± 0,6
Fisiologico	35,8	-5,8	36,7

Tabella 7 Valori dei punti significativi della cinematica dell'anca sana riportati come media ± deviazione standard

Riguardo al ginocchio patologico invece, la prima differenza rispetto al fisiologico riguarda i pazienti M01, M02, M04 ed F01, i quali non mostrano il picco di flessione in fase di appoggio ma una linea piatta o una curva che tende a scendere sotto lo zero, in particolare quest'ultimo caso si verifica per i pazienti M02, M04 ed F01, per i quali il

successivo picco di estensione in appoggio scende al di sotto del range fisiologico, dando origine una “iper estensione” (**Figure 74, 76 e 78**).

La terza differenza rispetto al fisiologico è il picco di flessione in fase di pendolamento, il quale per tutti i pazienti risulta posizionato più in basso rispetto al range fisiologico e per i pazienti M01 ed M04 assume una forma di una doppia onda (**Figure 73 e 76**).

In merito al picco di estensione in fase di pendolamento, quest’ultimo non assume la forma vista per l’andamento fisiologico, in quanto la curva raggiunge il minimo non in corrispondenza del 90% del ciclo del passo ma in corrispondenza del 100%, quindi non è visibile la risalita che caratterizza la curva fisiologica tra il picco di estensione e la fine del ciclo del passo. Per i pazienti M05 ed M03, il picco di estensione in fase di pendolamento risulta più alto del range fisiologico, mentre per il paziente M04 risulta più basso, dando quindi origine ad una seconda iper estensione ma in fase di pendolamento (**Figure 75, 76 e 77**).

Si riportano i valori dei punti significativi per il ginocchio patologico di tutti i pazienti in **Tabella 8**.

ID paziente	Picco di flessione in appoggio [°]	Picco di estensione in appoggio [°]	Picco di flessione in pendolamento [°]	Picco di estensione in pendolamento [°]
M01	Assente	1,4 ± 0,3	34,4 ± 1,4	9,9 ± 3,8
M02	Assente	-8,9 ± 0,6	18,0 ± 3,8	6,7 ± 3,6
M03	26,3 ± 1	4,4 ± 0,9	45,7 ± 1,3	22,9 ± 1,8
M04	Assente	-14,4 ± 0,6	17,5 ± 2,7	-9,8 ± 1,1
M05	35,6 ± 1,3	6,5 ± 1,1	39,1 ± 0,9	29,8 ± 1,3
F01	Assente	-2,2 ± 1,7	16,2 ± 2,7	0,7 ± 1.6
Fisiologico	19,3	6,2	59,1	3,9

Tabella 8. Valori dei punti significativi della cinematica del ginocchio patologico riportati come media ± deviazione standard.

In riferimento al ginocchio sano, la prima differenza rispetto all’andamento fisiologico è il picco di flessione in appoggio, che risulta più in alto del range fisiologico per i pazienti M01, M02 ed M05 (**Figure 73, 74 e 77**) e più basso per M04 (**Figura 76**).

La seconda differenza riguarda il picco di estensione in fase di appoggio, che per il paziente M04 si trova al di sotto del range fisiologico e quindi presenta una iper estensione (**Figura 76**), mentre per i pazienti F01, M05 ed M03 è posizionato al di sopra del range fisiologico e, sebbene vi sia una discesa a partire dal precedente picco di flessione, e

quindi possa essere considerato come un minimo della curva, la sua forma risulta diversa dal fisiologico e più appiattita (**Figure 75, 77 e 78**).

Il picco di estensione in pendolamento invece risulta più in alto del range fisiologico per tutti i pazienti ad eccezione di M04.

Per il solo paziente F01, sia il picco di flessione in appoggio che quello di estensione risultano molto più appiattiti rispetto alla forma fisiologica ma sono comunque presenti.

Si riportano i valori dei punti significativi per il ginocchio sano di tutti i pazienti in **Tabella 9**.

ID paziente	Picco di flessione in appoggio [°]	Picco di estensione in appoggio [°]	Picco di flessione in pendolamento [°]	Picco di estensione in pendolamento [°]
M01	34,0 ± 1,3	9,7 ± 1,7	68,0 ± 2,7	19,8 ± 3,3
M02	35,7 ± 1,3	8,2 ± 1,0	55,8 ± 3,4	33,5 ± 1,7
M03	23,3 ± 1,4	15,6 ± 0,9	58,1 ± 1,1	18,0 ± 1,2
M04	9,0 ± 0,9	-2,3 ± 1,6	51,8 ± 1,4	7,3 ± 1,0
M05	29,6 ± 1,0	22,6 ± 1,5	57,5 ± 0,3	21,4 ± 2,0
F01	25,7 ± 1,7	20,4 ± 1,0	60,2 ± 1,3	21,4 ± 1,8
Fisiologico	19,3	6,2	59,1	3,9

Tabella 9 Valori dei punti significativi della cinematica del ginocchio sano riportati come media ± deviazione standard.

Per la caviglia patologica, la prima differenza che si nota è che per tutti i pazienti eccetto M01 il massimo valore di plantiflessione raggiunto durante la fase di appoggio non ha la forma del picco fisiologico. Infatti, si nota come all'inizio del ciclo del passo i pazienti si trovino già con la caviglia in posizione plantiflessa, e quindi il massimo valore di plantiflessione lo si ha in corrispondenza dello 0% del ciclo anziché, come fisiologicamente dovrebbe essere, in corrispondenza dell'8% circa. Inoltre, il punto in questione risulta essere per i pazienti M03 ed M05 più alto del range fisiologico, mentre per il paziente M04 più basso.

La seconda differenza riguarda il picco di dorsiflessione in fase di appoggio, che risulta più alto del range fisiologico per i pazienti M01 ed M05 e più basso per M04.

Dalle **Figure 74 e 79** si vede come per i pazienti M02 ed F01 siano assenti sia il picco di plantiflessione in pendolamento che il picco di dorsiflessione in pendolamento, in quanto la curva dopo il picco di dorsiflessione in appoggio continua a scendere fino al 100% del ciclo del passo nel caso di M02 e fino a poco prima nel caso di F01

Per i pazienti M04 ed M05 invece, è assente il picco di dorsiflessione in pendolamento, infatti dalle **Figure 76 e 77** si vede come la curva a seguito del picco di plantiflessione in pendolamento si mantenga piatta fino alla fine del ciclo del passo per M05 e fino a poco prima per M04.

Altre differenze rispetto all'andamento fisiologico si riconoscono a) nel picco di plantiflessione in fase di pendolamento che, nei pazienti che lo presentano, risulta molto più alto rispetto al range fisiologico, e b) nel picco di dorsiflessione in pendolamento, che nei pazienti M01 ed M03 risulta posizionato più in alto rispetto al fisiologico.

Si riportano i valori dei punti significativi per la caviglia patologica di tutti i pazienti in **Tabella 10**.

ID paziente	Picco di plantiflessione in appoggio [°]	Picco di dorsiflessione in appoggio [°]	Picco di plantiflessione in pendolamento [°]	Picco di dorsiflessione in pendolamento [°]
M01	-7,1 ± 0,9	20,3 ± 1,3	11,5 ± 1,3	14,5 ± 1,5
M02	-2,8 ± 4,7	8,8 ± 1,7	Assente	Assente
M03	4,4 ± 0,6	15,8 ± 0,5	10,2 ± 0,6	14,7 ± 0,6
M04	-17,6 ± 2,8	5,2 ± 0,7	-1,7 ± 1,8	Assente
M05	4,4 ± 0,5	17,2 ± 0,7	3,4 ± 2,0	Assente
F01	-0,7 ± 1,8	9,2 ± 1,2	Assente	Assente
Fisiologico	-5,7	11,9	19,8	2,5

Tabella 10 Valori dei punti significativi della cinematica della caviglia patologica riportati come media ± deviazione standard.

Per quanto riguarda la caviglia sana invece, si nota principalmente come le curve per tutti i pazienti siano posizionate più in alto rispetto all'andamento fisiologico, e come per tutti i pazienti ad eccezione di F01 la curva mostri la forma del picco di plantiflessione in fase di appoggio tipica dell'andamento fisiologico.

In termini di altezza dei punti significativi si ha che: il picco di plantiflessione in appoggio risulta più alto del range fisiologico per i pazienti M02, M03 ed M05 (**Figure 74, 75 e 77**); i picchi di dorsiflessione sia in appoggio che in pendolamento risultano più alti del range fisiologico per tutti i pazienti ad eccezione di M04 (**Figure 73, 74, 77 e 78**); il picco di plantiflessione in pendolamento risulta più in alto del fisiologico per tutti i pazienti.

Si riportano i valori dei punti significativi per la caviglia sana di tutti i pazienti in **Tabella 11**.

ID paziente	Picco di plantiflessione in appoggio [°]	Picco di dorsiflessione in appoggio [°]	Picco di plantiflessione in pendolamento [°]	Picco di dorsiflessione in pendolamento [°]
M01	-0,8 ± 1,3	21,1 ± 0,4	2,2 ± 3,2	12,1 ± 1,5
M02	10,2 ± 0,6	18,3 ± 0,8	12,4 ± 1,2	15,8 ± 0,9
M03	1,6 ± 0,7	21,2 ± 0,3	-3,5 ± 1,6	4,9 ± 1,3
M04	-6,1 ± 1,1	14,8 ± 1,0	-7,5 ± 1,1	3,1 ± 1,6
M05	3,9 ± 0,5	25,2 ± 0,8	-0,7 ± 4,2	9,5 ± 0,3
F01	7,7 ± 1,5	24,3 ± 0,8	5,5 ± 2,4	12,6 ± 0,8
Fisiologico	-5,7	11,9	19,8	2,5

Tabella 11 Valori dei punti significativi della cinematica della caviglia sana riportati come media ± deviazione standard.

La seconda differenza che si può notare tra le curve fisiologiche e le curve dei pazienti sul piano sagittale riguarda invece l'altezza relativa tra i punti significativi precedentemente citati, la quale rappresenta la misura della flessione e dell'estensione durante le fasi di appoggio e pendolamento. Si riportano le escursioni significative per la cinematica di anca, ginocchio e caviglia sul piano sagittale nelle **Figure 81 e 82**.

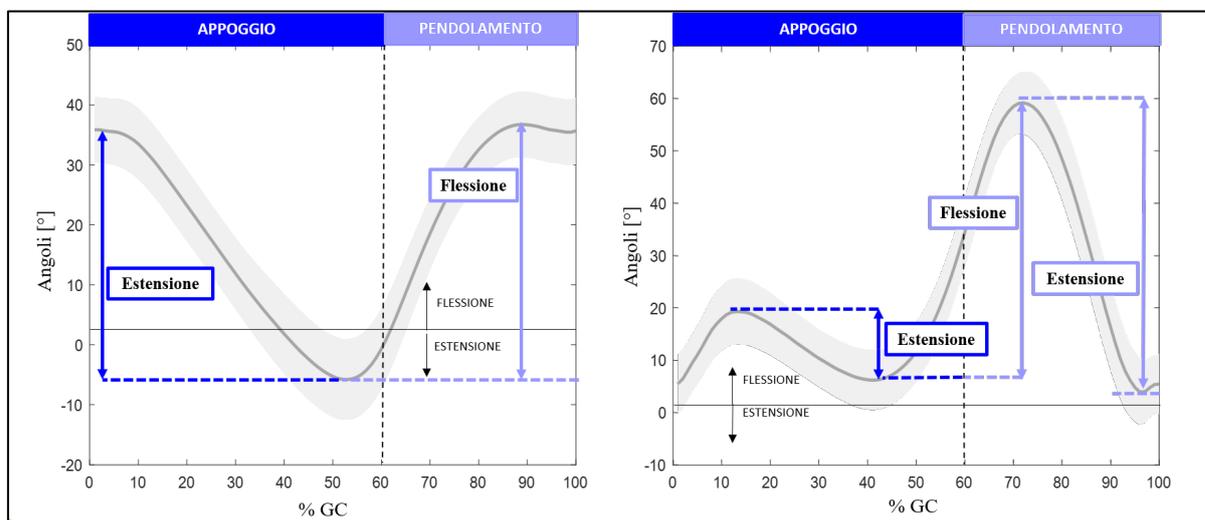


Figura 81. Escursioni tra i punti significativi delle curve cinematiche di anca e ginocchio.

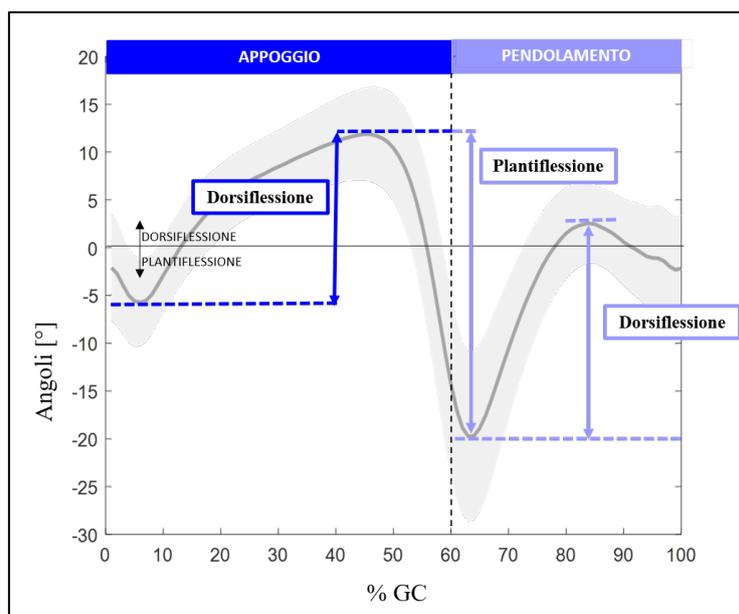


Figura 82 Escursioni tra i punti significativi delle curve cinematiche della caviglia.

In riferimento all'anca patologica, per tutti i pazienti risulta un valore sia di estensione in fase di appoggio che di flessione in fase di pendolamento minore rispetto ai valori fisiologici.

Si riportano i valori di flessione ed estensione per l'anca patologica in **Tabella 12**.

In questo caso, per tutti i pazienti il valore della flessione in fase di pendolamento è equivalente alla misura del ROM articolare (**Tabella 18**), ad eccezione di M01 ed F01 per i quali la misura del ROM equivale all'estensione in fase di appoggio.

ID paziente	Estensione in fase di appoggio [°]	Flessione in fase di pendolamento [°]
M01	26,6 ± 2,8	33,5 ± 2,3
M02	14,6 ± 2,8	21,7 ± 1,8
M03	32,5 ± 2,1	34,0 ± 1,6
M04	18,7 ± 1,5	35,0 ± 1,9
M05	33,4 ± 1,9	35,1 ± 2,7
F01	4,0 ± 1,3	8,9 ± 2,6
Fisiologico	41,6	42,5

Tabella 12. Escursioni tra i picchi significativi della cinematica dell'anca patologica riportate come media ± deviazione standard.

Per quanto riguarda l'anca sana, per tutti i pazienti ad eccezione di M01 ed M04, entrambe le escursioni risultano minori dei rispettivi valori fisiologici. Nel caso di M01 entrambe

le escursioni sono maggiori, mentre per M04 la sola flessione in fase di pendolamento risulta all'incirca uguale al fisiologico. Si riportano i valori di flessione ed estensione per l'anca sana in **Tabella 13**.

ID paziente	Estensione in fase di appoggio [°]	Flessione in fase di pendolamento [°]
M01	47,8 ± 1,9	46,9 ± 2,8
M02	32,4 ± 1,6	33,4 ± 1,4
M03	33,8 ± 1,8	34,8 ± 2,1
M04	38,3 ± 2,5	42,2 ± 1,9
M05	36,0 ± 1,6	36,8 ± 1,7
F01	31,9 ± 1,1	33,3 ± 1,3
Fisiologico	41,6	42,5

Tabella 13. Escursioni tra i picchi significativi della cinematica dell'anca sana riportate come media ± deviazione standard

Per il ginocchio invece, nel caso dell'arto patologico la prima differenza rispetto al fisiologico riguarda l'assenza dell'escursione in fase di appoggio per i pazienti M01, M02, M04 ed F01, dovuta alla mancanza del picco di flessione.

Per i pazienti M03 ed M05, che sono gli unici a mostrare il picco di flessione in fase di appoggio, è stato possibile calcolare l'escursione tra quest'ultimo ed il picco di estensione, risultata rispettivamente pari a $21,09 \pm 1,8$ e $29,2 \pm 2,4$ [°], ovvero entrambe maggiori rispetto al valore fisiologico di $13,1$ [°].

Ulteriori differenze, delle escursioni tra i punti significativi della cinematica del ginocchio patologico si riscontrano nella fase di pendolamento, per la quale tutti i pazienti mostrano minore flessione e minore estensione.

Come per l'anca, anche per il ginocchio patologico il valore della flessione in fase di pendolamento è equivalente alla misura del ROM articolare, riportato nella **Tabella 18**. Si riportano i valori di flessione ed estensione in fase di pendolamento per il ginocchio patologico in **Tabella 14**.

ID paziente	Flessione in fase di pendolamento [°]	Estensione in fase di pendolamento [°]
M01	33,0 ± 1,7	24,5 ± 5,2
M02	26,9 ± 4,4	11,3 ± 7,3
M03	41,3 ± 2,2	22,8 ± 3,1
M04	31,9 ± 3,4	27,2 ± 3,8

M05	32,7 ± 2,0	9,4 ± 2,2
F01	18,4 ± 4,4	15,4 ± 4,2
Fisiologico	53,0	55,2

Tabella 14 Escursioni tra i picchi significativi (per la sola fase di pendolamento) della cinematica del ginocchio patologico riportate come media ± deviazione standard.

Per quanto riguarda il ginocchio sano, le principali differenze con il fisiologico sono: a) una minore estensione in fase di appoggio per i pazienti M03, M04, M05 ed F01 ed un valore maggiore per i pazienti M01 ed M02; b) una minore flessione in fase di pendolamento per i pazienti M02, M03, M05 ed F01 ed un valore maggiore per M01 ed all'incirca uguale per M04; c) una minore estensione in fase di pendolamento per tutti i pazienti. In questo caso, per il solo paziente M05 il ROM risulta uguale all'estensione in fase di pendolamento invece che alla flessione. Si riportano i valori di flessione ed estensione in fase di pendolamento per il ginocchio sano in **Tabella 15**.

ID paziente	Estensione in fase di appoggio [°]	Flessione in fase di pendolamento [°]	Estensione in fase di pendolamento [°]
M01	24,3 ± 3,0	58,2 ± 4,4	48,2 ± 6,0
M02	27,5 ± 2,2	47,6 ± 4,4	22,3 ± 5,1
M03	7,7 ± 2,3	42,5 ± 2,0	40,1 ± 2,3
M04	11,2 ± 2,5	54,0 ± 3,0	44,5 ± 2,5
M05	7,1 ± 2,5	35,0 ± 1,8	36,1 ± 2,3
F01	5,3 ± 2,6	39,8 ± 2,3	38,8 ± 3,1
Fisiologico	13,1	53,0	55,2

Tabella 15. Escursioni tra i picchi significativi della cinematica del ginocchio sano riportati come media ± deviazione standard

Per la cavaglia patologica le principali differenze rispetto ai valori fisiologici in questo caso riguardano: a) la misura della dorsiflessione in fase di appoggio che risulta maggiore per M01 ed M04 e minore per tutti gli altri; b) la misura di plantiflessione in pendolamento che risulta minore per tutti i pazienti che la presentano; c) la misura della dorsiflessione in pendolamento, che risulta minore per i soli due pazienti che la presentano.

In questo caso, soltanto per i pazienti M01, M02 ed M03 il ROM articolare riportato nella **Tabella 18** coincide con la misura della dorsiflessione in fase di appoggio, mentre per gli altri tre pazienti risulta essere leggermente diverso, ed assume un valore minore rispetto al fisiologico.

Si riportano i valori delle escursioni tra punti significativi della caviglia patologica in **Tabella 16**.

ID paziente	Dorsiflessione in fase di appoggio [°]	Plantiflessione in fase di pendolamento [°]	Dorsiflessione in fase di pendolamento [°]
M01	27,5 ± 2,2	8,8 ± 2,6	3,0 ± 2,8
M02	11,6 ± 6,3	Assente	Assente
M03	11,4 ± 1,1	5,6 ± 1,1	4,5 ± 1,2
M04	22,7 ± 3,5	6,9 ± 2,5	Assente
M05	12,8 ± 1,2	13,8 ± 2,8	Assente
F01	9,9 ± 3,0	Assente	Assente
Fisiologico	17,6	31,6	22,3

Tabella 16. Escursioni tra i picchi significativi della cinematica della caviglia patologica riportati come media ± deviazione standard.

Per quanto riguarda la caviglia sana, la dorsiflessione in appoggio risulta minore del fisiologico per i soli M02 ed F01 e maggiore per tutti gli altri, Inoltre, tutti i pazienti presentano dei valori sia di dorsiflessione che di plantiflessione in pendolamento minori rispetto al fisiologico.

Anche in questo caso ci sono delle differenze tra i valori di ROM e quelli delle escursioni, in particolare, per il paziente M01 il ROM corrisponde alla dorsiflessione in fase di appoggio, e per i pazienti M03, M04 ed M05 corrisponde alla plantiflessione in fase di pendolamento, mentre per M02 ed F01 non corrisponde a nessuna delle tre escursioni.

Si riportano i valori delle escursioni tra punti significativi della caviglia sana in **Tabella 17**.

ID paziente	Dorsiflessione in fase di appoggio [°]	Plantiflessione in fase di pendolamento [°]	Dorsiflessione in fase di pendolamento [°]
M01	21,9 ± 1,8	18,9 ± 4,7	9,9 ± 5,6
M02	8,1 ± 1,4	5,9 ± 2,0	3,4 ± 2,1
M03	19,6 ± 0,9	24,7 ± 1,9	8,5 ± 2,9
M04	20,9 ± 2,1	22,3 ± 2,1	10,6 ± 2,7
M05	21,3 ± 1,4	25,9 ± 5,0	10,2 ± 4,5
F01	16,7 ± 2,2	18,8 ± 3,1	7,1 ± 3,1
Fisiologico	17,6	31,6	22,3

Tabella 17 Escursioni tra i picchi significativi della cinematica della caviglia sana riportati come media ± deviazione standard

Si riportano, in **Tabella 18** per l'arto patologico, e in **Tabella 19** per l'arto sano, i ROM articolari di anca ginocchio e caviglia.

ID paziente	ROM Anca [°]	ROM ginocchio [°]	ROM caviglia [°]
M01	33,5 ± 2,3	33,0 ± 1,7	27,5 ± 2,2
M02	21,7 ± 1,8	26,9 ± 4,4	11,6 ± 6,3
M03	34,0 ± 1,6	41,3 ± 2,2	11,4 ± 1,1
M04	35,0 ± 1,9	31,9 ± 3,3	23,3 ± 3,2
M05	35,1 ± 2,7	32,7 ± 2,0	14,5 ± 2,2
F01	8,9 ± 2,6	18,4 ± 4,4	12,5 ± 3,1
Fisiologico	42,5	55,2	31,6

Tabella 18. ROM di anca, ginocchio e caviglia nel piano sagittale riferiti all'arto patologico riportati come media ± deviazione standard.

ID paziente	ROM Anca [°]	ROM ginocchio [°]	ROM caviglia [°]
M01	47,8 ± 1,9	58,2 ± 4,4	21,9 ± 1,8
M02	33,4 ± 1,4	47,6 ± 4,4	9,7 ± 1,9
M03	34,8 ± 2,1	42,5 ± 2,0	24,7 ± 1,9
M04	42,2 ± 1,9	54,0 ± 3,0	22,3 ± 2,1
M05	36,8 ± 1,7	36,1 ± 1,6	25,9 ± 5,0
F01	33,3 ± 1,3	39,8 ± 2,2	19,4 ± 2,6
Fisiologico	42,5	55,2	31,6

Tabella 19. ROM di anca, ginocchio e caviglia nel piano sagittale riferiti all'arto sano riportati come media ± deviazione standard.

Per tutte e tre le articolazioni, i ROM del lato patologico (**Tabella 18**) sono minori dei rispettivi valori fisiologici. Al contrario, per i ROM del lato sano (**Tabella 19**), si nota nuovamente un ROM di anca, ginocchio e caviglia minore rispetto al fisiologico, ad eccezione di M01 che mostra un ROM di anca e di ginocchio maggiore.

Si riportano nelle **Figure 83, 84, 85, 86, 87 e 88**, la cinematica della sola caviglia (patologica e sana) acquisita prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) sul piano frontale, e nelle **Figure 89, 90, 91, 92, 93 e 94** la cinematica della sola caviglia (patologica e sana), acquisita prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) sul piano trasversale.

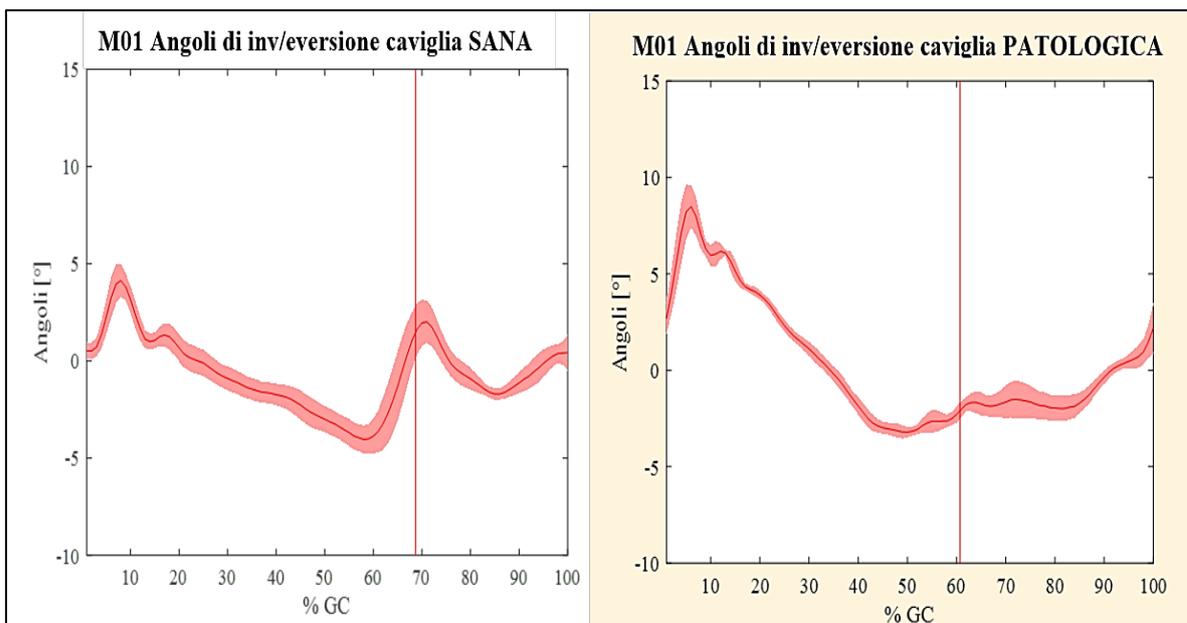


Figura 83. Cinematica articolare della caviglia nel piano frontale per entrambi gli arti di M01, prima dell'iniezione di tossina botulinica

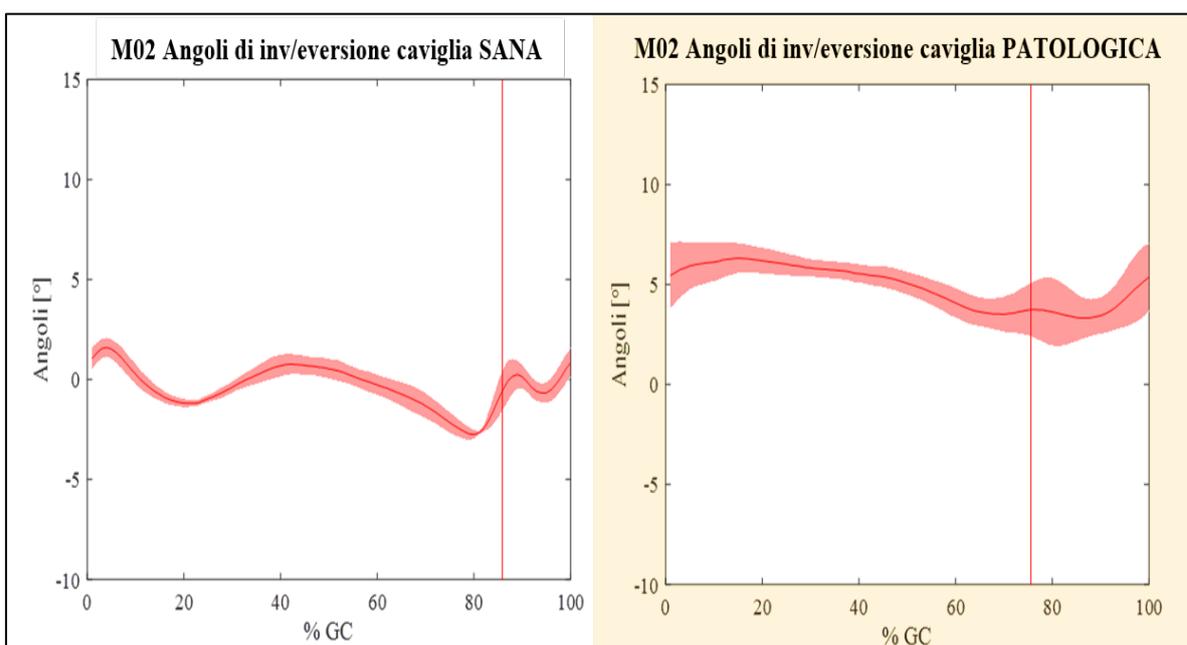


Figura 84. Cinematica articolare della caviglia nel piano frontale per entrambi gli arti di M02, prima dell'iniezione di tossina botulinica

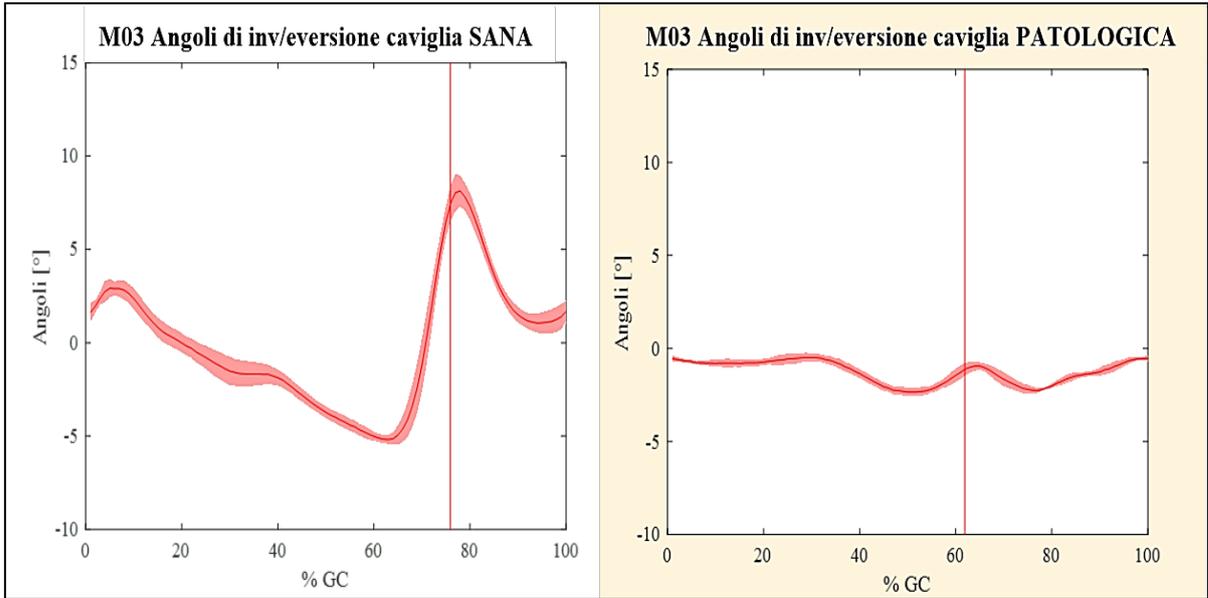


Figura 85. Cinematica articolare della caviglia nel piano frontale per entrambi gli arti di M03, prima dell'iniezione di tossina botulinica

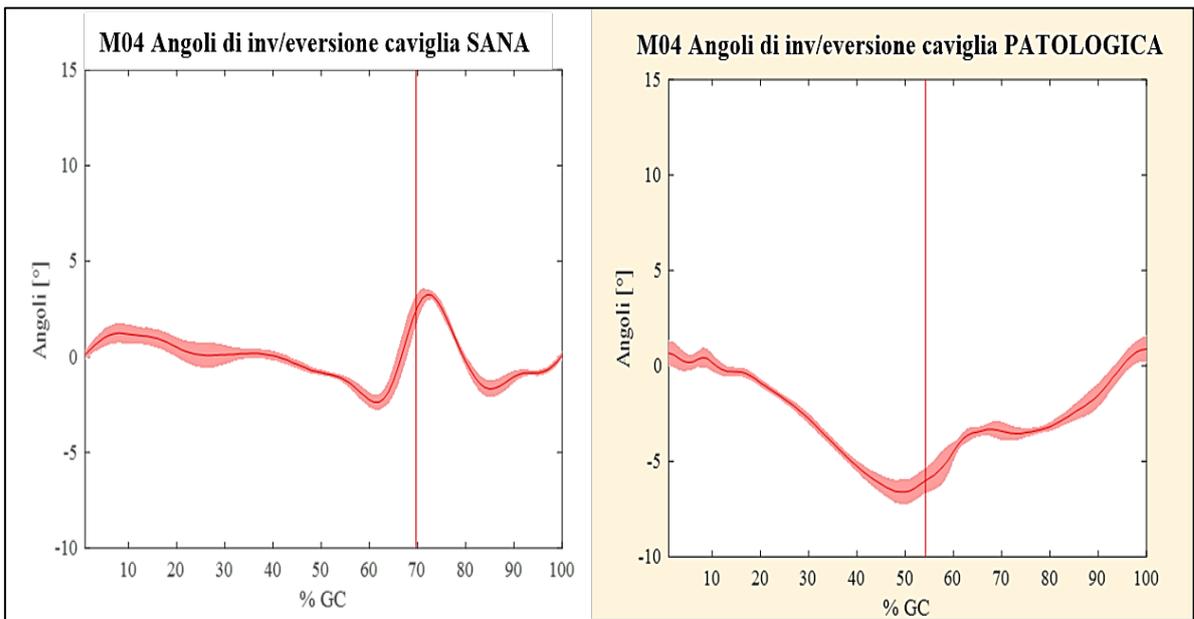


Figura 86. Cinematica articolare della caviglia nel piano frontale per entrambi gli arti di M04, prima dell'iniezione di tossina botulinica

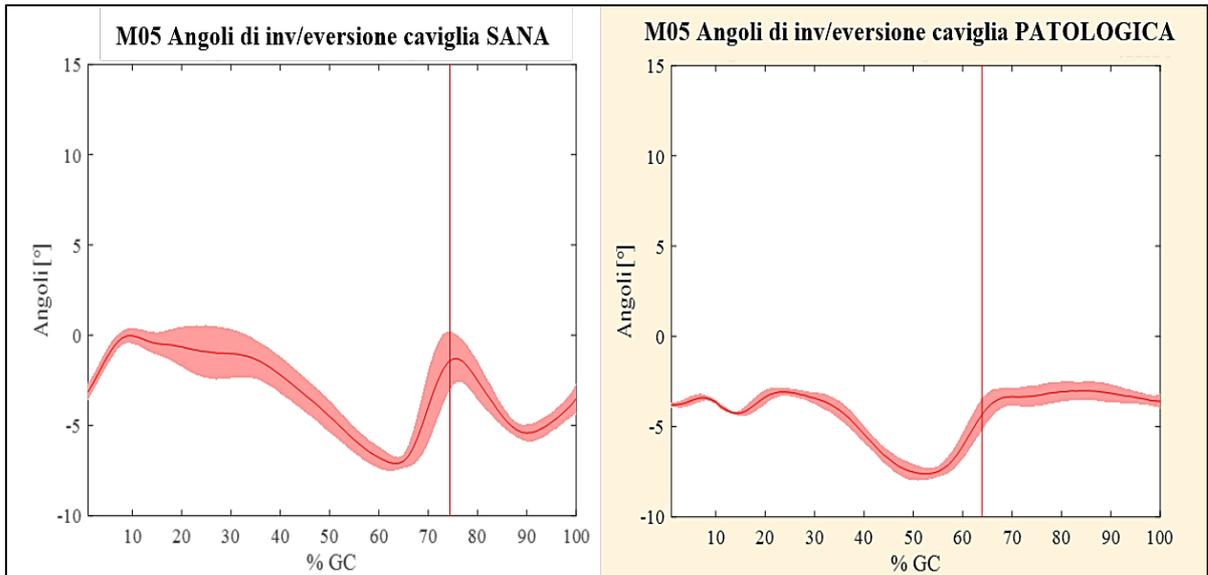


Figura 87. Cinematica articolare della caviglia nel piano frontale per entrambi gli arti di M05, prima dell'iniezione di tossina botulinica

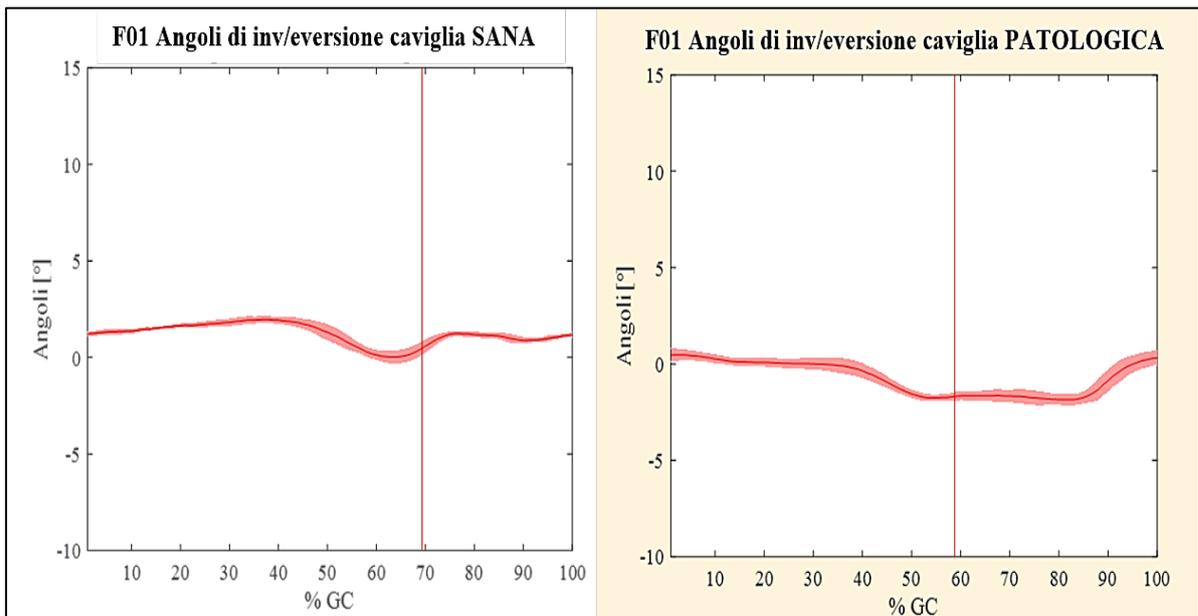


Figura 88. Cinematica articolare della caviglia nel piano frontale per entrambi gli arti di F01, prima dell'iniezione di tossina botulinica

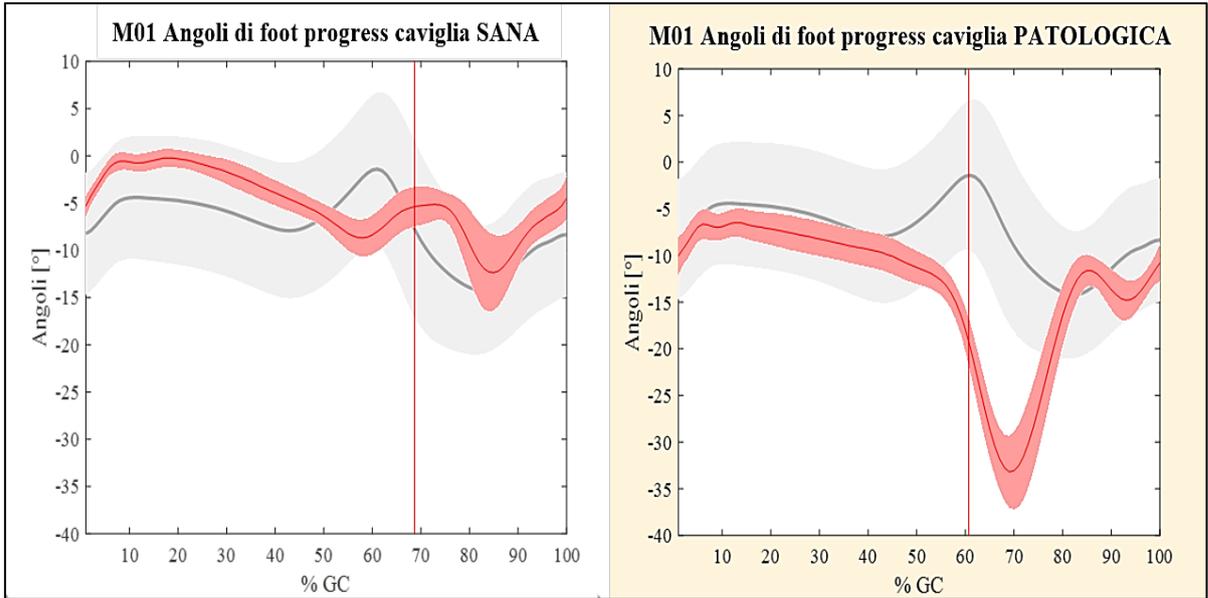


Figura 89. Cinematica articolare della caviglia nel piano trasversale per entrambi gli arti di M01, prima dell'iniezione di tossina botulinica

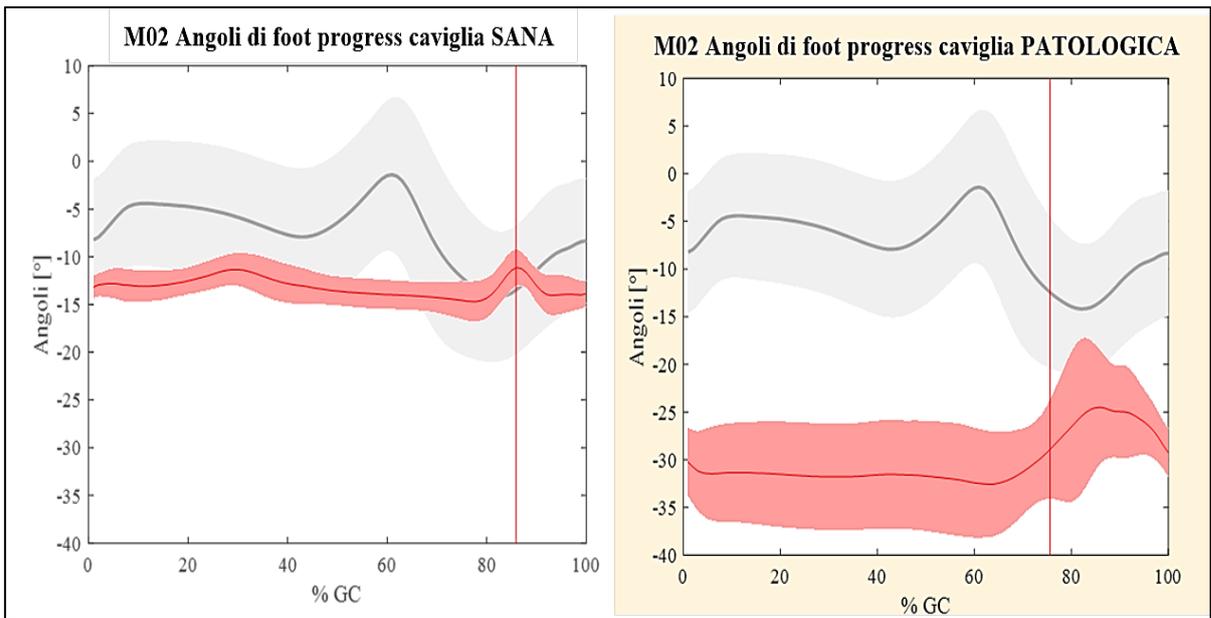


Figura 90. Cinematica articolare della caviglia nel piano trasversale per entrambi gli arti di M02, prima dell'iniezione di tossina botulinica

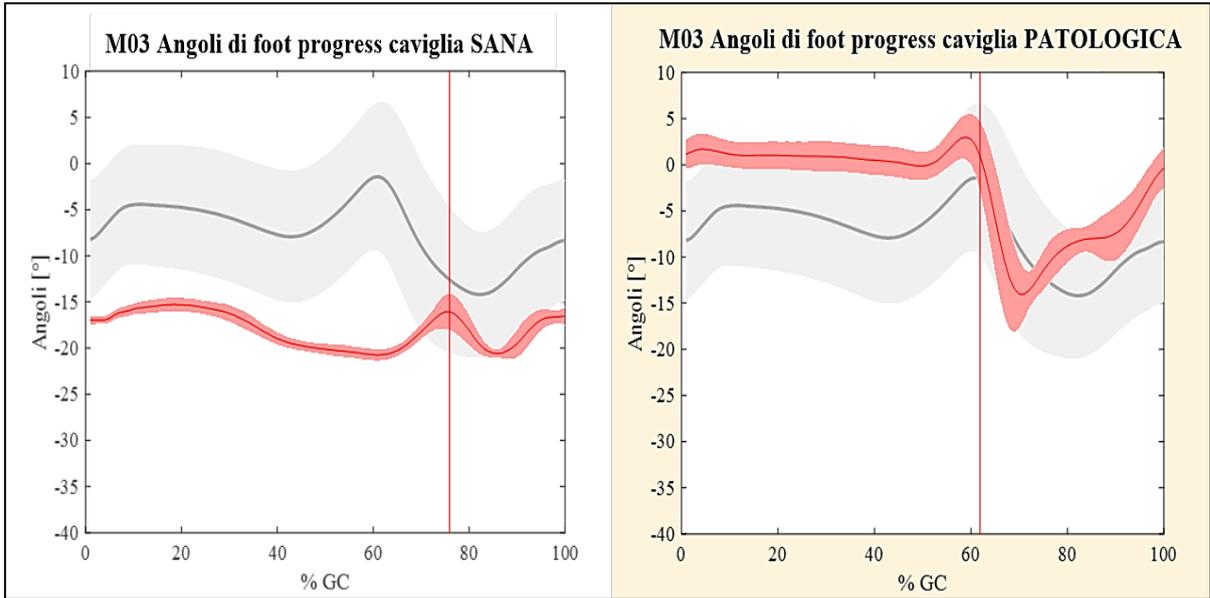


Figura 91 Cinematica articolare della caviglia nel piano trasversale per entrambi gli arti di M03 prima dell'iniezione di tossina botulinica

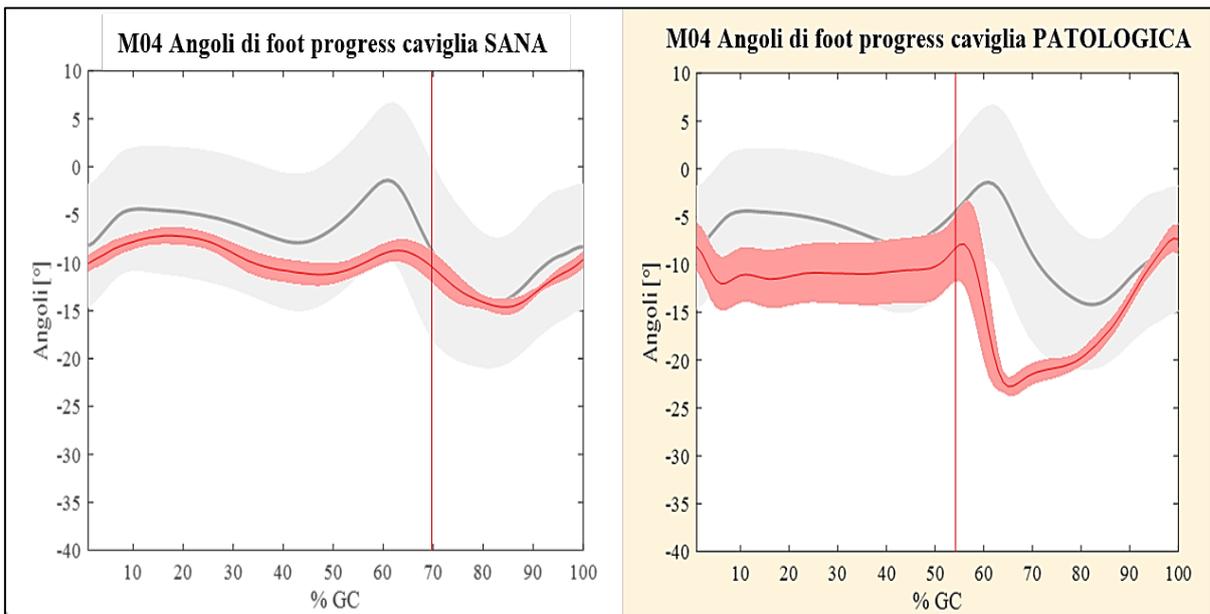


Figura 92. Cinematica articolare della caviglia nel piano trasversale per entrambi gli arti di M04 prima dell'iniezione di tossina botulinica

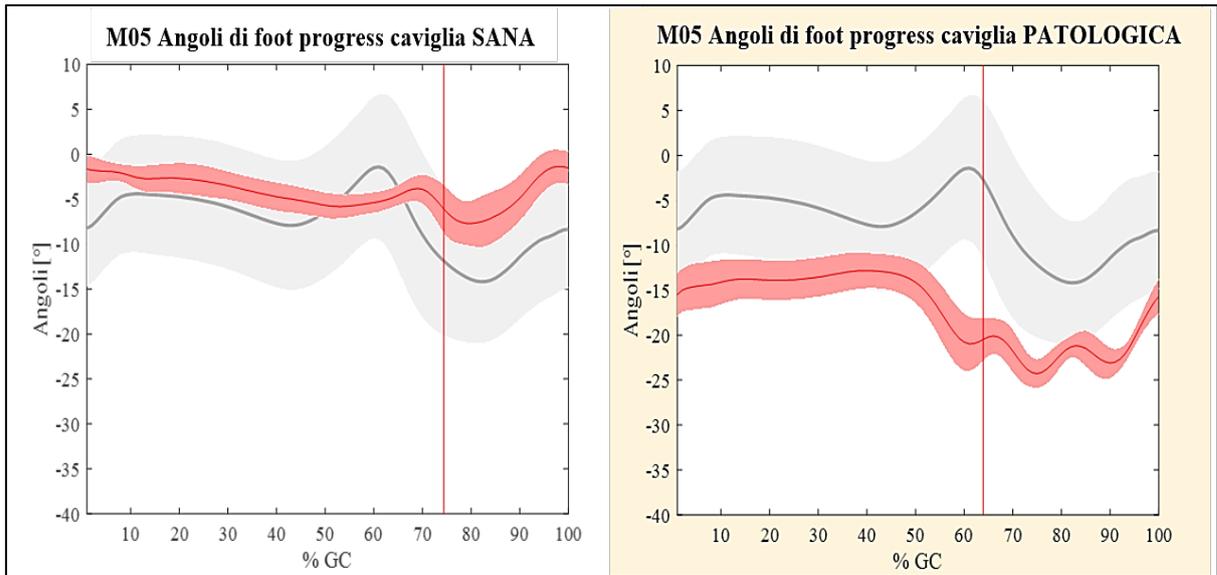


Figura 93. Cinematica articolare della caviglia nel piano trasversale per entrambi gli arti di M05 prima dell'iniezione di tossina botulinica

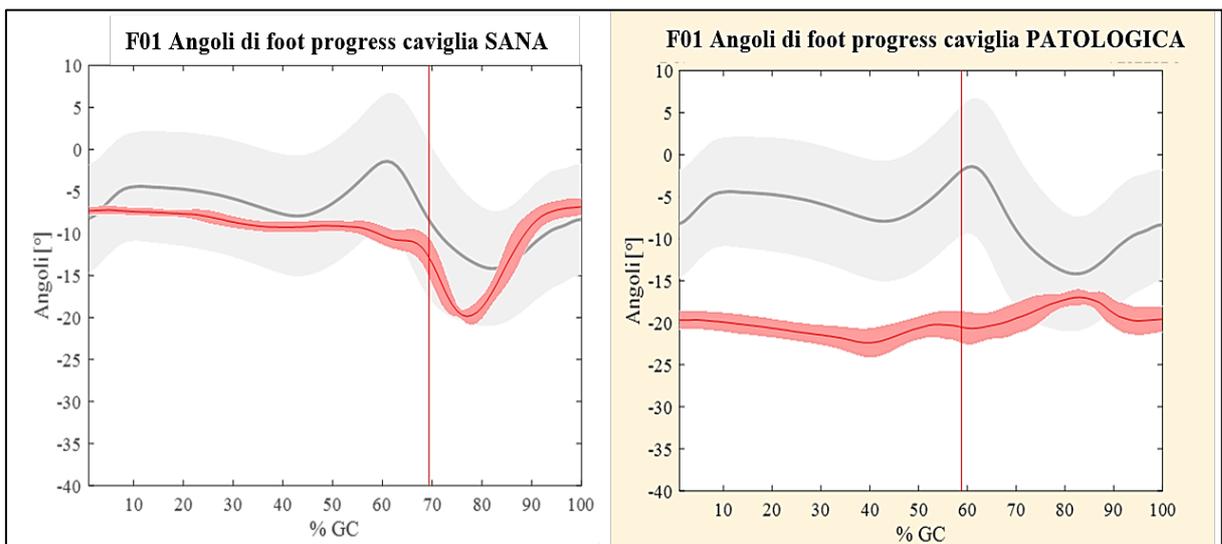


Figura 94. Cinematica articolare della caviglia nel piano trasversale per entrambi gli arti di F01 prima dell'iniezione di tossina botulinica

Per quanto riguarda il piano frontale, non disponendo di un andamento fisiologico risulta difficile stabilire eventuali anomalie; si riportano quindi in **Tabella 20** i ROM articolari della caviglia sana e della caviglia patologica.

ID paziente	ROM caviglia sana [°]	ROM caviglia patologica [°]
M01	8,2 ± 1,6	11,7 ± 1,4
M02	4,4 ± 0,6	3,0 ± 1,7
M03	13,3 ± 1,2	1,9 ± 0,3

M04	5,6 ± 0,6	7,5 ± 1,3
M05	7,1 ± 1,2	4,6 ± 0,8
F01	2,0 ± 0,5	2,3 ± 0,5

Tabella 20 ROM della caviglia patologica e della caviglia sana nel piano frontale riportati come media ± deviazione standard.

Infine, per quanto riguarda il piano trasversale, a differenza del piano frontale è stato possibile fare un confronto tra il valore del ROM fisiologico e il valore del ROM presentato dai pazienti, sia per la caviglia patologica che per quella sana, che vengono riportati in **Tabella 21**. Quanto risulta è che: per i pazienti M01, M03 ed M04, il ROM della caviglia patologica è maggiore rispetto al fisiologico, mentre per gli altri pazienti è minore, ad eccezione di M05 per il quale risulta molto simile. Nel caso della caviglia sana i pazienti M01 ed F01 presentano dei valori di ROM molto simili al fisiologico mentre per gli altri si hanno valori più bassi.

ID paziente	ROM caviglia sana [°]	ROM caviglia patologica [°]
M01	12,1 ± 4,4	26,6 ± 5,1
M02	3,5 ± 3,4	8,1 ± 5,0
M03	5,5 ± 1,5	17,0 ± 2,2
M04	7,5 ± 1,8	15,5 ± 4,0
M05	6,3 ± 4,0	11,5 ± 3,3
F01	13,0 ± 1,0	5,4 ± 2,3
Fisiologico	12,8	12,8

Tabella 21 ROM della caviglia patologica e della caviglia sana nel piano trasversale e ROM fisiologico riportati come media ± deviazione standard.

5.3 Analisi dei parametri spazio-temporali pre iniezione di tossina botulinica

Per tutti e sei i pazienti, oltre ai parametri cinematici sono stati acquisiti anche parametri spazio temporali “globali”, quindi calcolati come media tra i due arti, e parametri spazio temporali “differenziati”, quindi riferiti a ciascun arto. I parametri spazio temporali globali che sono stati acquisiti sono: cadenza, lunghezza del passo, larghezza del passo, tempo del passo e velocità. I parametri spazio temporali differenziati che sono stati acquisiti sono: la percentuale del ciclo del passo spesa in singolo supporto (SLS), la percentuale del ciclo del passo spesa in doppio supporto (DS) ed il Limp index, usato per valutare eventuali asimmetrie e calcolato per ciascun arto come rapporto tra la durata

della fase di appoggio dell'arto in questione e la durata della fase di appoggio dell'arto controlaterale. Si riportano in **Tabella 22** i parametri spazio temporali globali e nelle **Tablelle 23 e 24** i parametri spazio temporali differenziati, acquisiti per i sei pazienti prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0),

E' noto (Neumann, 2013) che per soggetti sani la velocità del cammino è di circa 1,37 m/s, la cadenza di circa 110 passi /min, la lunghezza del passo di circa 1,44 m e la larghezza di circa 0,08-0,10 m. Facendo un confronto tra questi valori e quanto riportato in **Tabella 22**, si nota chiaramente come per tutti i pazienti la velocità, la cadenza e la lunghezza del passo assumano valori minori rispetto al fisiologico. Nel caso invece della larghezza del passo, questa assume un valore maggiore rispetto al fisiologico.

ID paziente	Velocità [m/s]	Lunghezza passo [m]	Larghezza passo [m]	Tempo passo [s]	Cadenza [passi/min]
M01	0.72 ± 0.05	1.05 ± 0.02	0.21 ± 0.01	1.46 ± 0.08	82.2 ± 4.0
M02	0.14 ± 0.05	0.40 ± 0.02	0.22 ± 0.06	2.96 ± 0.19	40.7 ± 2.4
M03	0.52 ± 0.03	0.77 ± 0.04	0.25 ± 0.02	1.48 ± 0.08	81.3 ± 4.1
M04	0.45 ± 0.04	0.71 ± 0.06	0.27 ± 0.03	1.60 ± 0.04	75.3 ± 1.5
M05	0.53 ± 0.03	0.81 ± 0.05	0.25 ± 0.01	1.55 ± 0.05	77.7 ± 2.4
F01	0.21 ± 0.02	0.51 ± 0.04	0.24 ± 0.06	2.38 ± 0.11	50.5 ± 2.0

Tabella 22. Parametri spazio-temporali globali (media ± deviazione standard) acquisiti per i sei pazienti durante la visita 0

ID paziente	SLS [%GC]	DS [%GC]	LI
M01	30.2 ± 2.0	30.5 ± 1.7	0.87 ± 0.01
M02	14.6 ± 1.5	61.0 ± 2.0	0.88 ± 0.03
M03	24.5 ± 0.9	37.4 ± 2.2	0.82 ± 0.03
M04	31.4 ± 1.4	22.8 ± 2.8	0.79 ± 0.03
M05	25.3 ± 3.7	38.6 ± 4.6	0.86 ± 0.04
F01	18.4 ± 1.0	43.6 ± 3.6	0.76 ± 0.05

Tabella 23. Parametri spazio-temporali (media ± deviazione standard) per il solo arto patologico dei sei pazienti acquisiti alla visita 0. GC: Gait cycle (ciclo del passo).

ID paziente	SLS [%GC]	DS [%GC]	LI
M01	40.2 ± 1.0	28,50 ± 2,3	1.15 ± 0.02
M02	24.5 ± 0.7	61.40 ± 1.1	1.14 ± 0.03

M03	38.2 ± 1.2	37.70± 1.6	1.23 ± 0.03
M04	46.8 ± 1.0	22.90 ± 2.3	1.31 ± 0.02
M05	36.7 ± 1.7	37.7 ± 3.0	1.18 ± 0.07
F01	39.3 ± 2.8	43.3 ± 3.9	1.36 ± 0.06

Tabella 24 Parametri spazio-temporali (media ± deviazione standard) per il solo arto sano dei sei pazienti acquisiti alla visita 0. GC: Gait cycle (ciclo del passo).

Per quanto riguarda i parametri di tipo differenziato, occorre ricordare che per un arto appartenente ad un soggetto sano, il 60% del ciclo del passo è speso in appoggio (piede a contatto con il terreno) ed il 40% è speso in pendolamento (piede in aria). La fase di appoggio, come visto in precedenza, può essere divisa ulteriormente in: a) una prima fase di doppio supporto (sia l'arto di interesse che il controlaterale sono a contatto con il suolo), che ha durata da 0 a 10% del ciclo del passo, b) un'unica fase di singolo supporto (l'arto d'interesse a contatto con il terreno mentre il controlaterale è in pendolamento), che ha durata da 10 a 50% del ciclo del passo, c) una fase di doppio supporto, che ha durata da 50 a 60% del ciclo del passo. Quindi, in condizioni normali il singolo arto spende all'incirca il 20% del ciclo del passo in doppio supporto ed il 40% in singolo supporto. Dalla **Tabella 23** si vede come per quasi tutti i pazienti (ad eccezione di M04) la fase di doppio supporto risulti più lunga del normale e la fase di singolo supporto risulti più breve del normale. Questo accade in quanto i pazienti tendono a trascorrere meno tempo possibile in singolo supporto sull'arto patologico e quindi ad aiutarsi il più possibile con l'arto controlaterale, e questo comporta una durata maggiore delle fasi di doppio supporto.

Dalla somma della durata delle fasi di singolo e doppio supporto per ciascun arto, è possibile risalire alla durata totale della fase di appoggio, che, ad eccezione di M02, risulta essere intorno al 70% del ciclo del passo per l'arto sano e al 60% del ciclo del passo per l'arto patologico. Una quantificazione dell'asimmetria tra il tempo di appoggio dei due arti è fornita dal Limp Index che, in condizioni normali sarebbe uguale ad uno, mentre in questo caso per l'arto patologico è inferiore ad uno (quindi il tempo in singolo supporto dell'arto è minore di quello del suo controlaterale) e per l'arto sano è superiore ad uno (il tempo speso da questo in singolo supporto è maggiore del suo controlaterale).

Capitolo 6

Analisi del cammino post-iniezione di tossina botulinica

Le curve cinematiche dei giunti di anca ginocchio e caviglia acquisite a distanza di 30, 60, 90 e 120 giorni dall'iniezione di tossina botulinica sono state rappresentate e confrontate con le curve acquisite prima dell'iniezione e con i rispettivi andamenti fisiologici. Lo stesso è stato fatto per i parametri spazio temporali. Per ogni paziente si sono evidenziati i miglioramenti ed i peggioramenti registrati in corrispondenza delle singole visite per ognuno dei parametri analizzati. Si è giunti alla conclusione che gli effetti della tossina botulinica sulla cinematica articolare dell'arto patologico sono maggiormente visibili a distanza di 30 giorni dall'iniezione, mentre per l'arto sano e per i parametri spazio temporali si sono ottenuti risultati diversi per ogni paziente. Non si sono trovate somiglianze apprezzabili tra gli andamenti dei parametri cinematici e quelli dei parametri spazio temporali, ma per tre pazienti è stata notata una corrispondenza tra la visita alla quale si sono visti i maggiori effetti della tossina sui parametri cinematici e la visita alla quale si sono visti i maggiori effetti della tossina sui parametri spazio temporali.

6.1 Analisi della cinematica dell'anca nel piano sagittale post-iniezione di tossina botulinica

Si riportano nelle **Figure 95, 96, 97, 98, 99 e 100** la cinematica per anca sana e per anca patologica di tutti i sei pazienti. In tutte le figure ogni colore è indicativo di una visita, in particolare: in rosso la visita 0 (pre-iniezione), in blu la visita 1 (30 giorni dall'iniezione), in verde la visita 2 (60 giorni dall'iniezione), in viola la visita 3 (90 giorni dall'iniezione) ed in giallo la visita 4 (120 giorni dall'iniezione). In grigio si riportano i valori fisiologici. Come detto nel precedente capitolo, le principali differenze tra la cinematica dell'arto patologico e la cinematica fisiologica dell'anca nel piano sagittale si riscontrano nel valore che assumono i punti significativi della curva (picchi di flessione ed estensione) e nel valore delle escursioni che si misurano tra di essi (estensione, flessione e ROM

articolare). Per ogni visita, si riporta nelle **Figure 101 e 102**, sotto forma di istogramma, il valore assunto dai punti significativi della curva in corrispondenza delle varie visite.

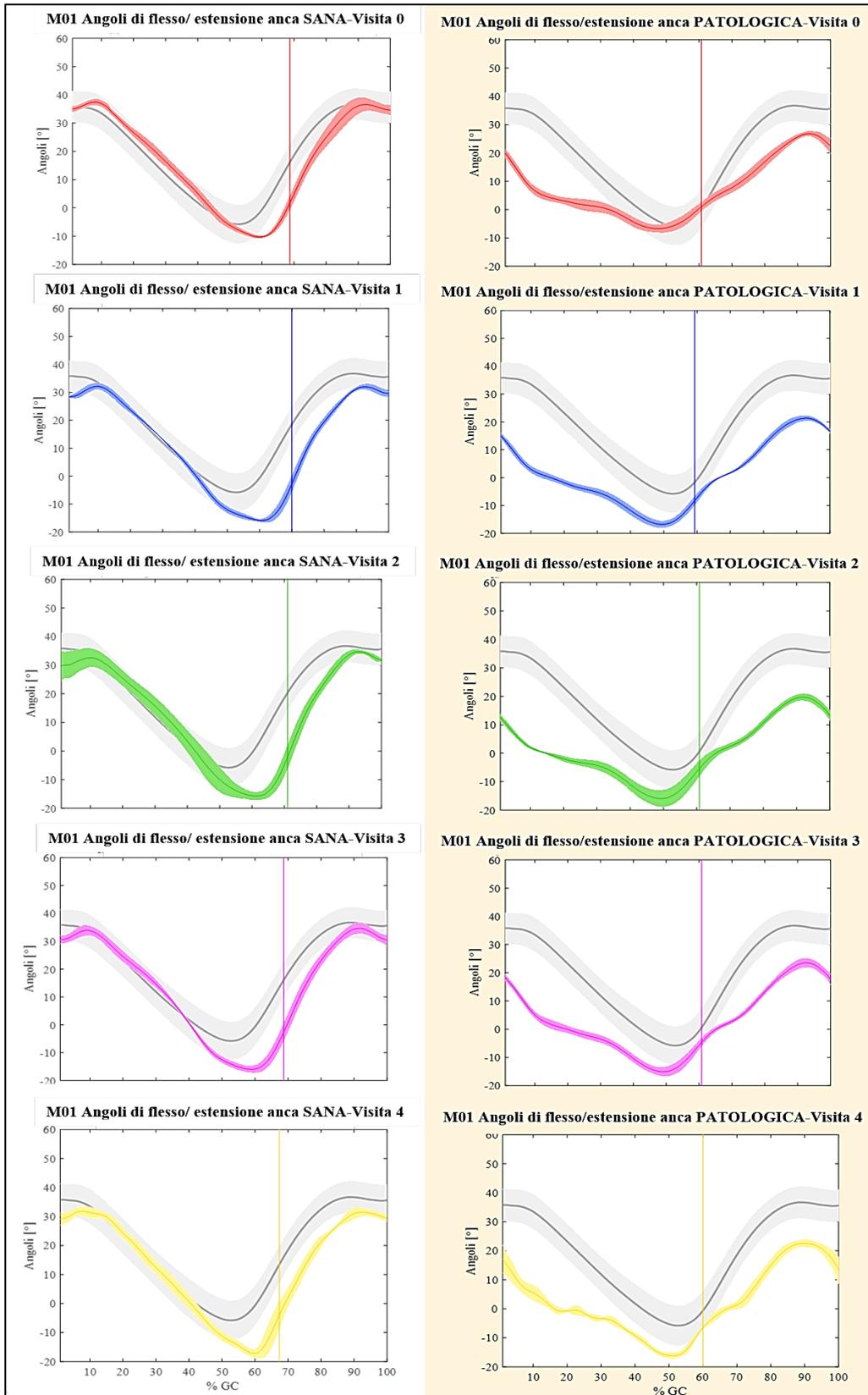


Figura 95. Angoli di flessione/estensione di anca per entrambi gli arti di M01, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

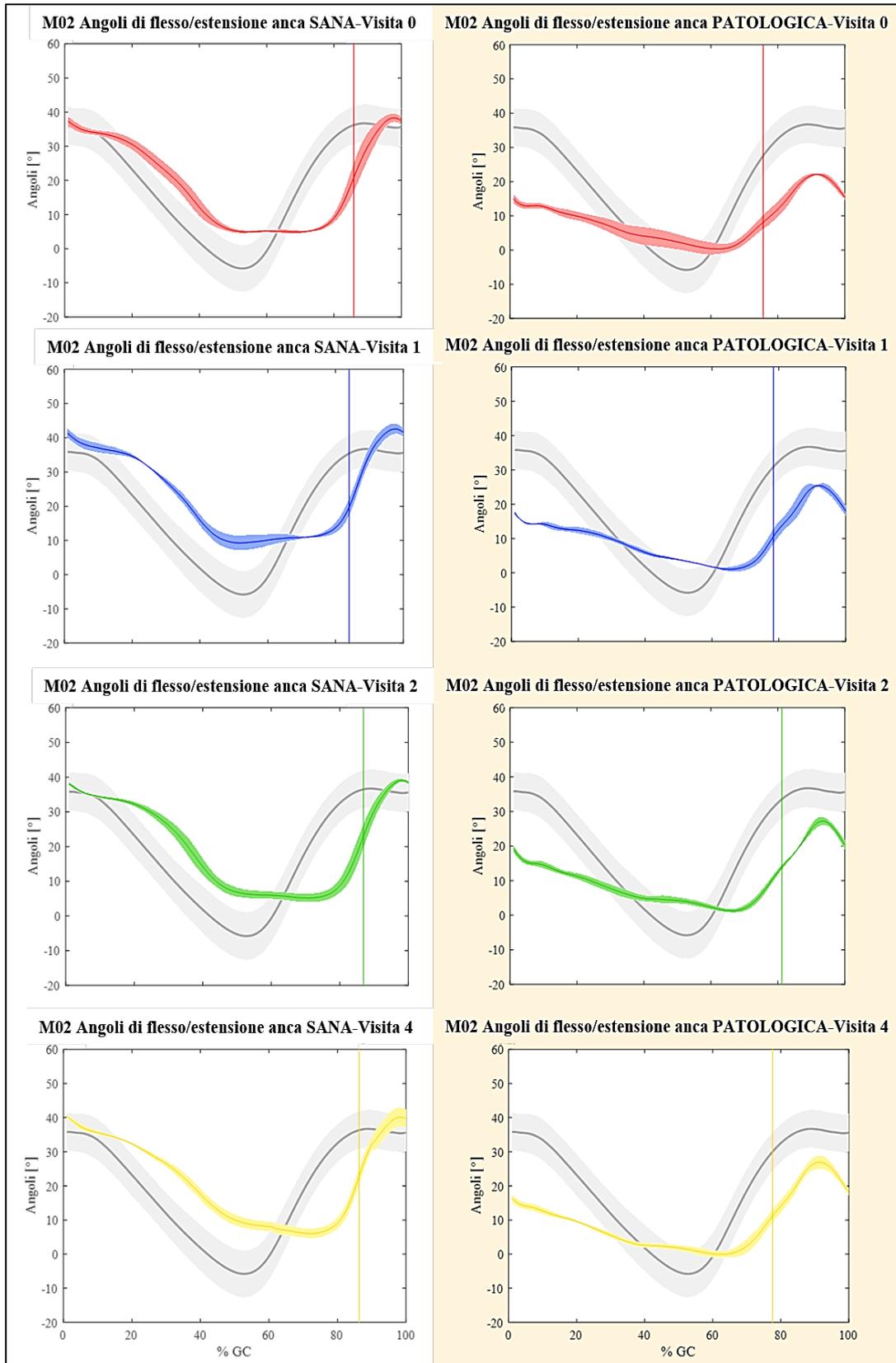


Figura 96 Angoli di flessione/estensione di anca per entrambi gli arti di M02, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30, 60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

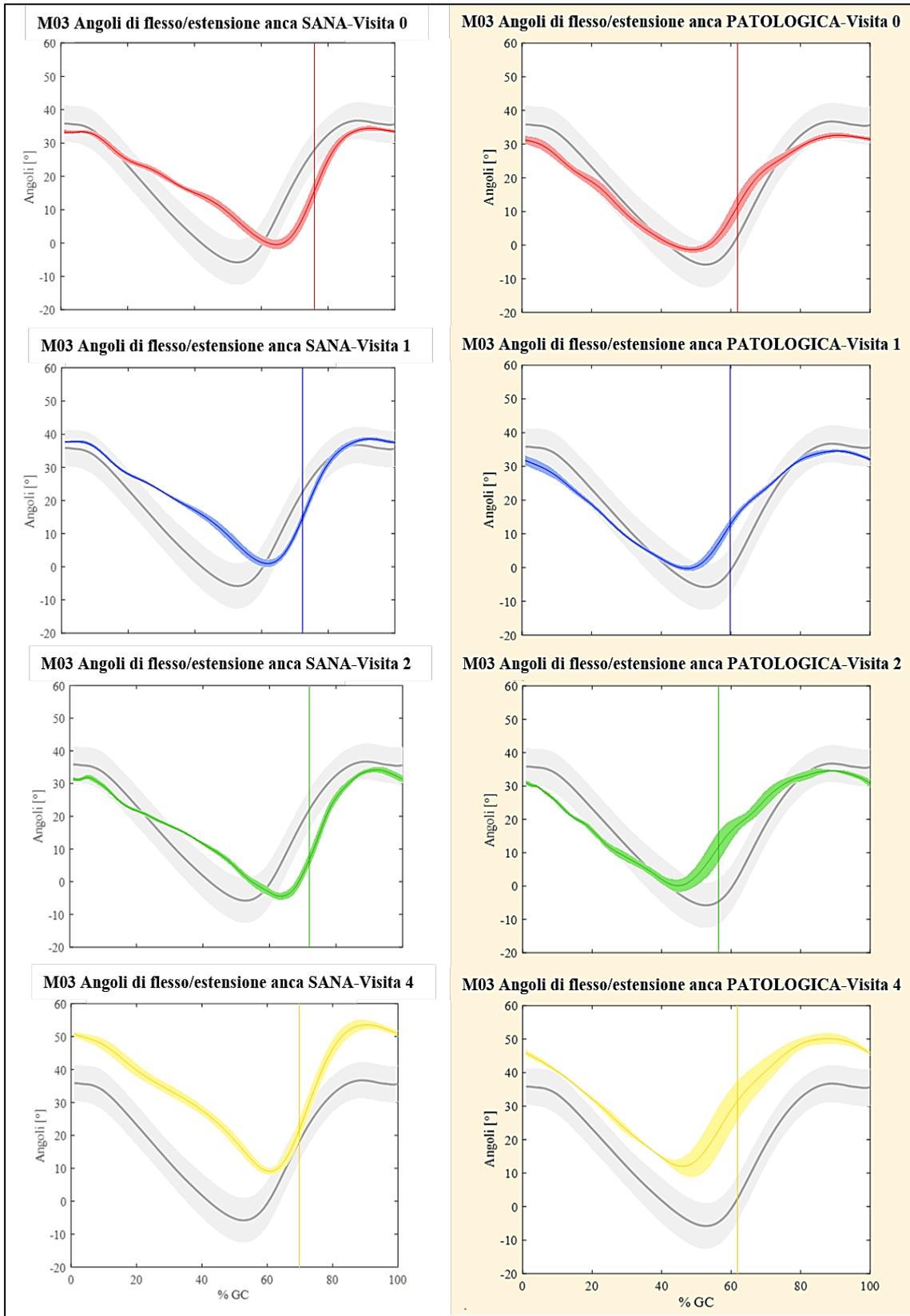


Figura 97 Angoli di flessione/estensione di anca per entrambi gli arti di M03, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30, 60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

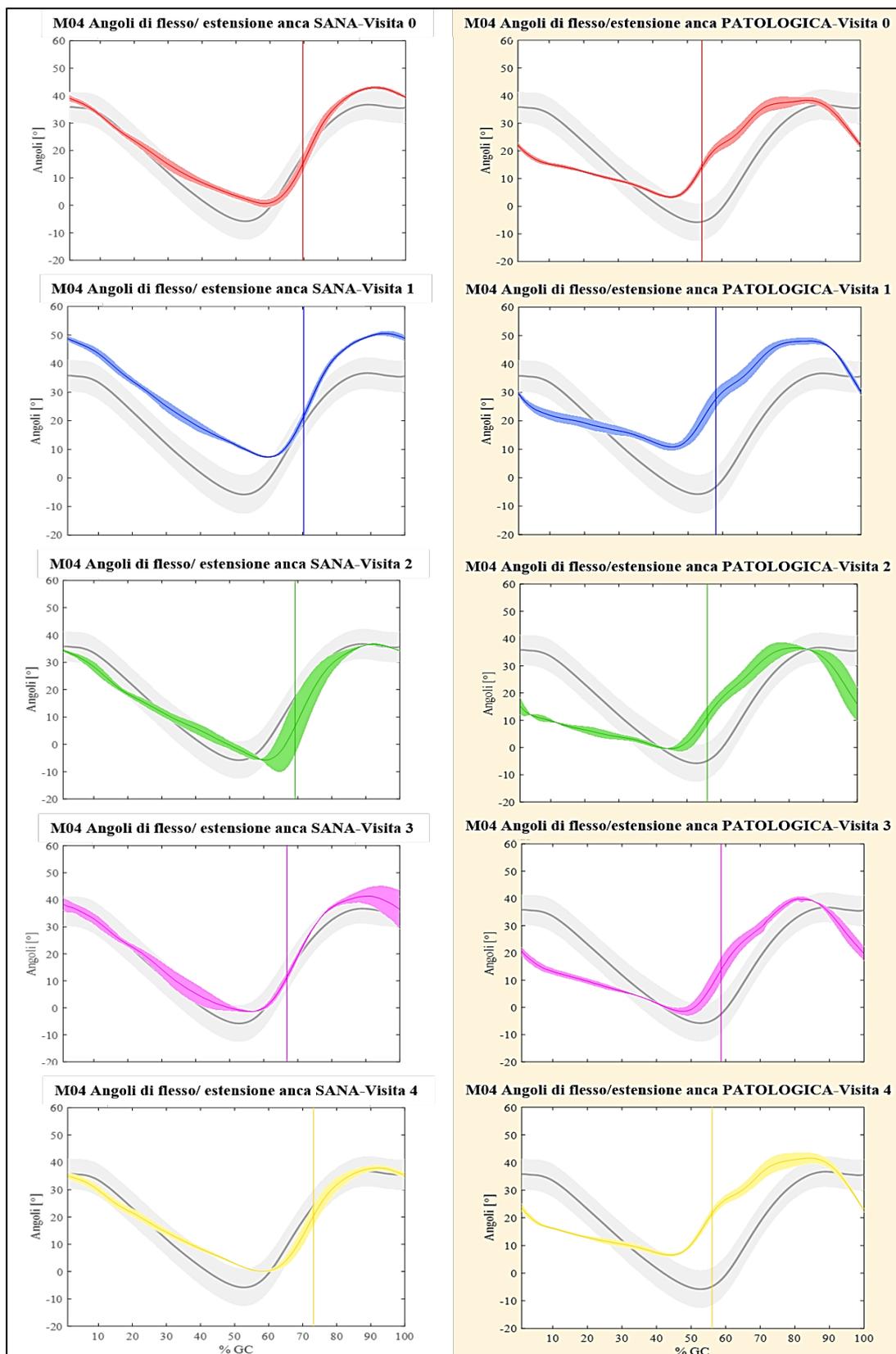


Figura 98 Angoli di flesso estensione di anca per entrambi gli arti di M04, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

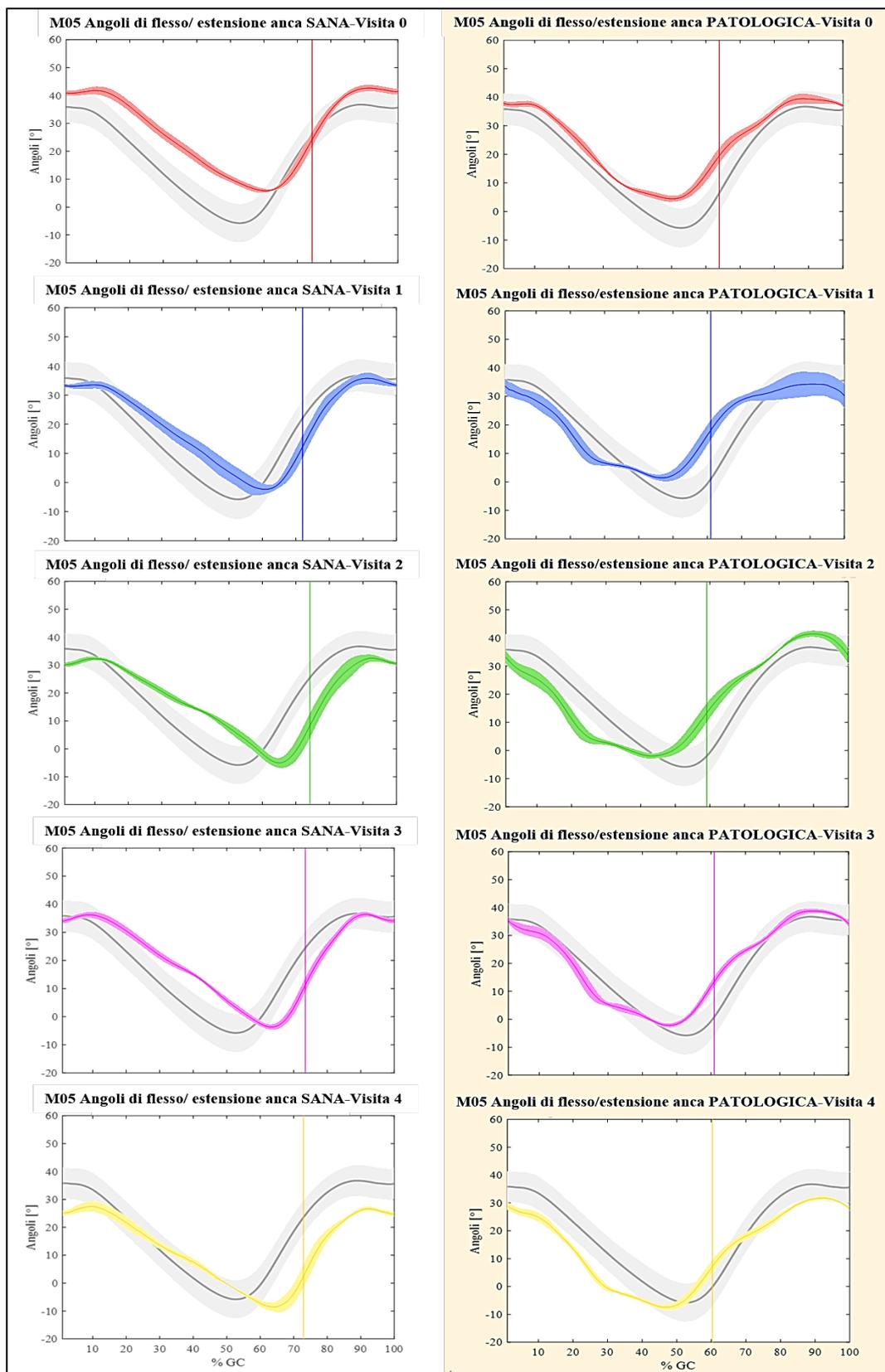


Figura 99 Angoli di flessione/estensione di anca per entrambi gli arti di M05, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30, 60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

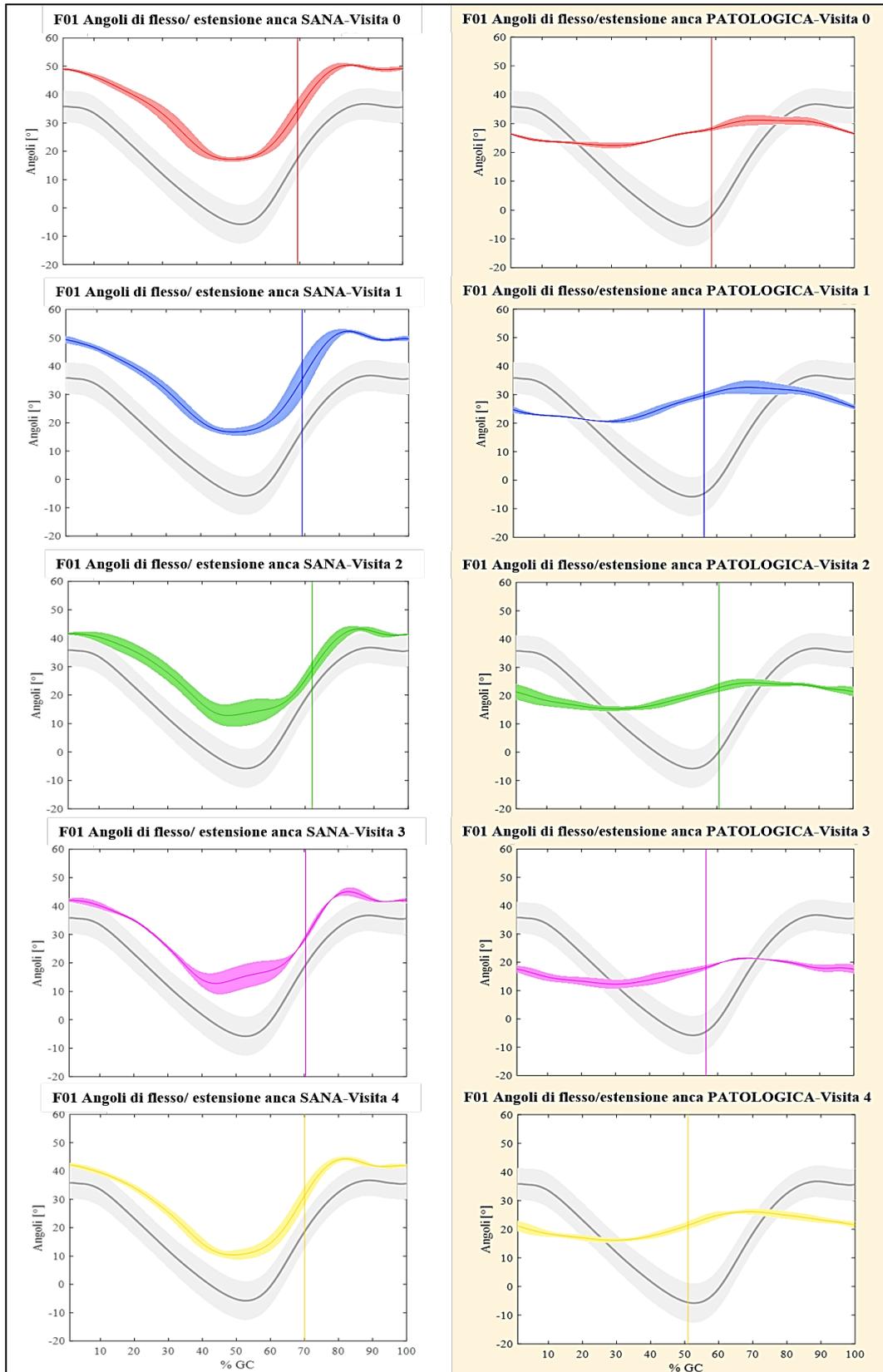


Figura 100 Angoli di flessione/estensione di anca per entrambi gli arti di F01, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30, 60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

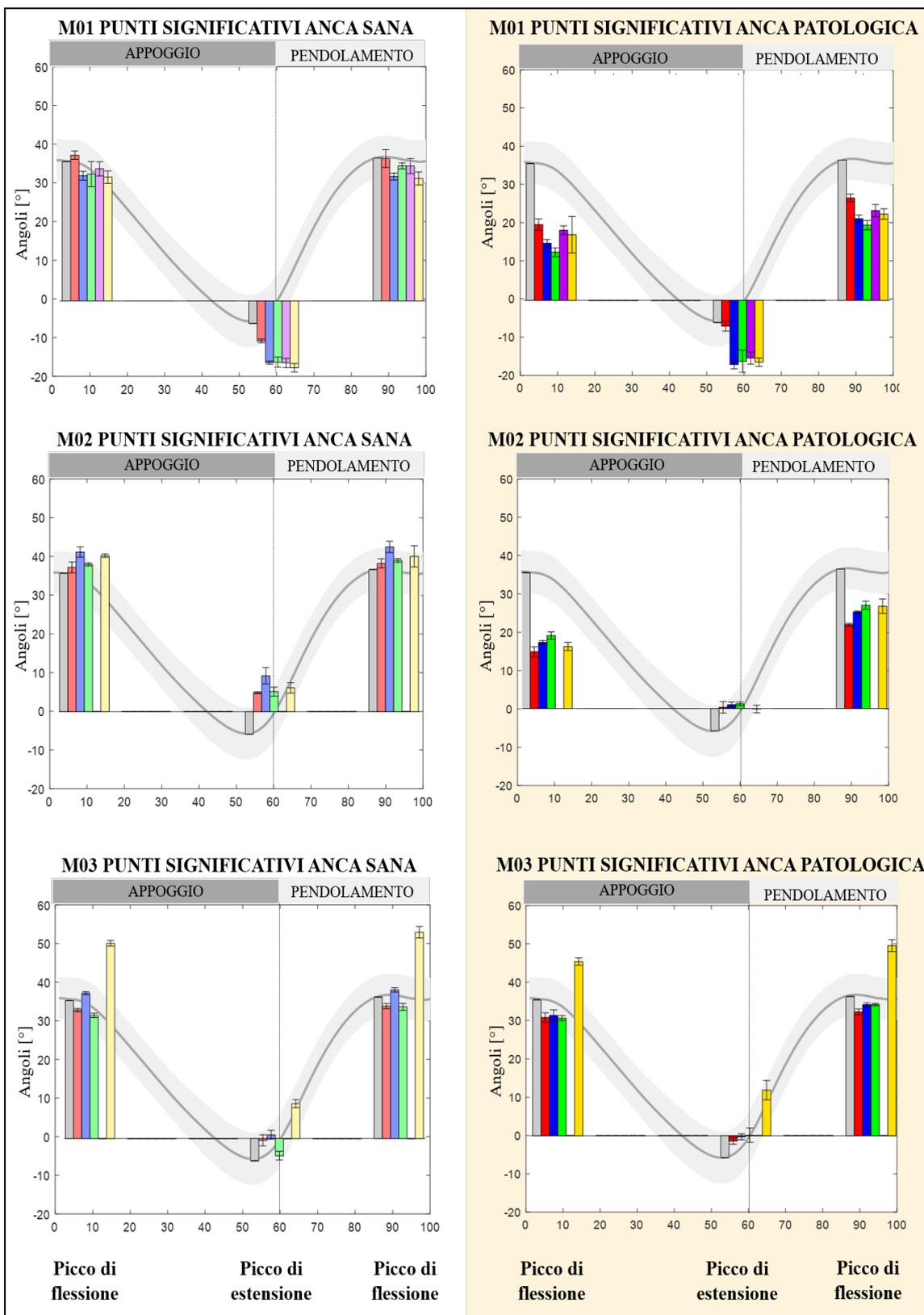


Figura 101 Valori assunti dai punti significativi della curva cinematica di anca. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia è il valore fisiologico del picco.

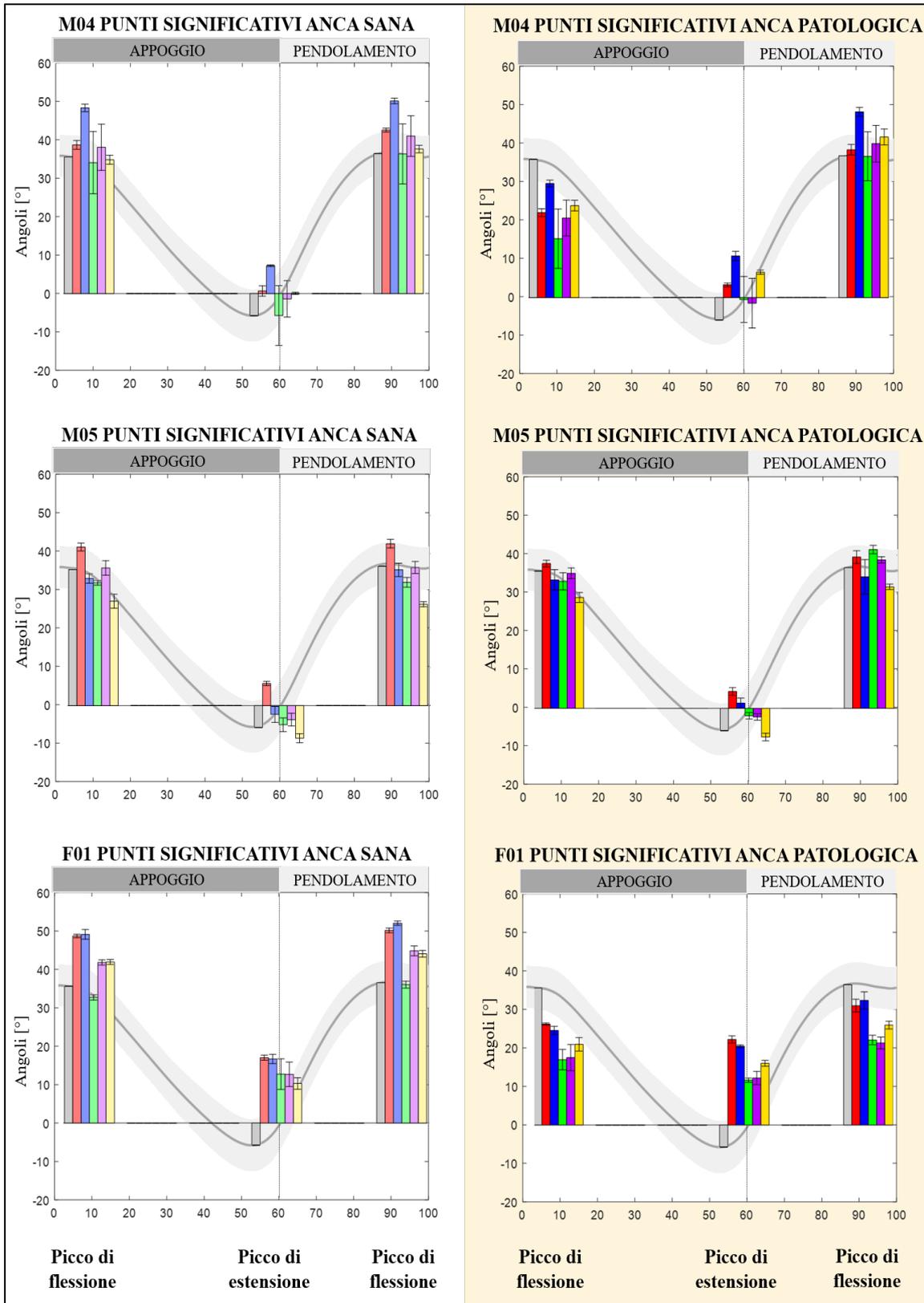


Figura 102 Valori assunti dai punti significativi della curva cinematica di anca. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia è il valore fisiologico del picco.

Per quanto riguarda l'arto patologico, la prima differenza tra la cinematica acquisita alla visita 0 e l'andamento fisiologico era il picco di flessione in appoggio al di sotto del range fisiologico per i pazienti M01, M02, M04 ed F01, che dalle **Figure 101 e 102** si vede come aumenti in altezza per i pazienti M02 ed M04, raggiungendo il valore più vicino al fisiologico rispettivamente alla visita 2 ed alla visita 1 (ma non rientrando mai nel range fisiologico), mentre esso si abbassa ulteriormente per i pazienti M01 ed F01, raggiungendo la massima distanza dal fisiologico in corrispondenza della visita 2. Per i pazienti M03 ed M05, i quali alla visita 0 mostravano un picco di flessione in appoggio all'interno del range fisiologico, questo si mantiene tale fino alla visita 4, quando per entrambi fuoriesce, alzandosi per M03 ed abbassandosi per M05 (**Figure 97 e 99**).

Una seconda differenza riguardava il picco di estensione in appoggio, più alto del range fisiologico per i pazienti F01, M04 ed M05 che (**Figure 101 e 102**), si abbassa per i pazienti F01 ed M05, raggiungendo il valore più vicino al fisiologico rispettivamente alla visita 2 e alla visita 4 (ma rientrando nel range fisiologico solo per M05 come si vede dalla **Figura 99**), mentre per M04 subisce un iniziale aumento alla visita 1 per poi abbassarsi raggiungendo il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 3. Per i pazienti M01, M02 ed M03, per i quali il picco di estensione in appoggio rientrava inizialmente nel range fisiologico, si ha invece un peggioramento nel caso di M01 ed M03, i cui picchi scendono, allontanandosi dal range e nessuna particolare variazione nel caso di M02.

Infine, il picco di flessione in fase di pendolamento, che per i pazienti M02 ed M01 risultava più basso del range fisiologico (**Figura 101 e 102**), per M02 aumenta in altezza, raggiungendo il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 2 (ma senza mai rientrare nel range), mentre si abbassa ulteriormente per il paziente M01, allontanandosi al massimo dal fisiologico in corrispondenza della visita 2. Per quanto riguarda gli altri pazienti che alla visita 0 mostravano un picco di flessione in pendolamento all'interno del range fisiologico: per M03 ed M04 si ha una fuoriuscita dal range a causa di un innalzamento della curva rispettivamente alle visite 4 e 1 (**Figure 97 e 98**), per M05 si mantiene sempre nel range, mentre per F01 si ha una discesa con uscita dal range e valore più lontano dal fisiologico raggiunto alla visita 3 (**Figura 100**).

In relazione all'arto sano, dalle **Figure 101 e 102** si vede come nella maggior parte dei casi l'andamento dei picchi significativi rispecchi quello dei picchi dell'arto patologico. Nel capitolo precedente, i pazienti M02, M05 ed F01 mostravano un picco di estensione in appoggio più alto rispetto al fisiologico e solo F01 mostrava anche i valori del picco di flessione in appoggio e in pendolamento più alti del fisiologico. Dalle **Figure 101 e 102** si vede che per quanto riguarda il picco di estensione, per i pazienti M05 ed F01 vi è un

abbassamento, con il raggiungimento del valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 4 per F01, e della visita 2 per M05 (ma solo per quest'ultimo esso rientra nel range fisiologico come si vede in **Figura 99**), mentre per M02 si ha un aumento ulteriore dell'altezza del picco, con allontanamento massimo dal fisiologico in corrispondenza della visita 1. Infine, per F01 si ha un abbassamento della curva grazie al quale i picchi di flessione raggiungono il valore più vicino al fisiologico e rientrano nel range in corrispondenza della visita 2 (**Figura 100**), mentre il picco di estensione raggiunge il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 4 (ma non rientra mai nel range).

Come detto in precedenza, la tossina botulinica produce effetti, oltre che sul valore assoluto dei picchi, anche sulle loro distanze relative. Per alcuni dei pazienti questi effetti sono visibili già dalle **Figure 101 e 102**, dove si nota un contemporaneo innalzamento di alcuni picchi ed abbassamento di altri, e quindi una conseguente variazione di altezza relativa tra essi. Tuttavia, anche nel caso di innalzamenti ed abbassamenti contemporanei, vi possono essere delle differenze nell'ordine di grandezza dei movimenti di ciascun picco, e questo comporta delle variazioni di altezza relativa non facilmente visibili nelle figure precedenti. Si riportano quindi, nelle **Figure 103 e 104**, sottoforma di istogrammi, le escursioni tra i picchi significativi della cinematica dell'anca misurate ad ogni visita, unitamente al ROM articolare.

Come visto nel precedente capitolo, tutti i pazienti presentavano per l'anca patologica una minore estensione in fase di appoggio ed una minore flessione in fase di pendolamento rispetto ai valori fisiologici. Per quanto riguarda l'estensione, dalle **Figure 103 e 104** si nota come la tossina botulinica ne modifichi il valore, avvicinandolo al fisiologico, in particolare: per M01, M04, M05 ed F01, la misura di estensione più vicina al fisiologico si è acquisita in corrispondenza della visita 3, per M02 in corrispondenza della visita 2 e per M03 in corrispondenza della visita 4.

La flessione invece risulta essere più vicina al valore fisiologico in corrispondenza della visita 4 per i pazienti M01, M02 ed M03, della visita 3 per M04, della visita 2 per M05 e della visita 1 per F01. Sebbene tutti i pazienti presentino un miglioramento, bisogna sottolineare come per alcuni di essi questo è preceduto da un peggioramento, ossia da un allontanamento ulteriore dal rispettivo valore fisiologico. Questo si verifica, nel caso dell'estensione per M03, M04 ed M05, e nel caso della flessione per il solo M05.

In riferimento all'arto sano, si era visto come in tutti i pazienti, ad eccezione di M01 ed M04, entrambe le escursioni risultassero minori rispetto al valore fisiologico (per M04 risultava minore soltanto l'estensione). Dalle **Figure 103 e 104**, si vede come per quanto riguarda l'estensione in fase di appoggio vi sia un aumento, con il raggiungimento del

valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 4 per M02 ed M03, della visita 1 per M04 ed F01 e della visita 3 per M05. Il paziente M01, che invece mostrava un valore più alto del fisiologico, subisce un ulteriore aumento, con un allontanamento massimo dal fisiologico in corrispondenza della visita 3.

Per quanto riguarda invece la flessione in fase di pendolamento, questa aumenta per i pazienti M03, M05 ed F01, raggiungendo il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza rispettivamente delle visite 4, 3 ed 1, mentre rimane all'incirca costante per M02. Per M01, il quale mostrava un valore superiore al fisiologico già alla visita 0, la flessione in pendolamento aumenta ulteriormente. Per quanto riguarda M04, il quale alla visita 0 aveva una flessione in pendolamento pari al fisiologico, si vede come questa rimanga all'incirca costante fino alla visita 3, per poi diminuire (allontanandosi quindi dal fisiologico) in corrispondenza della visita 4.

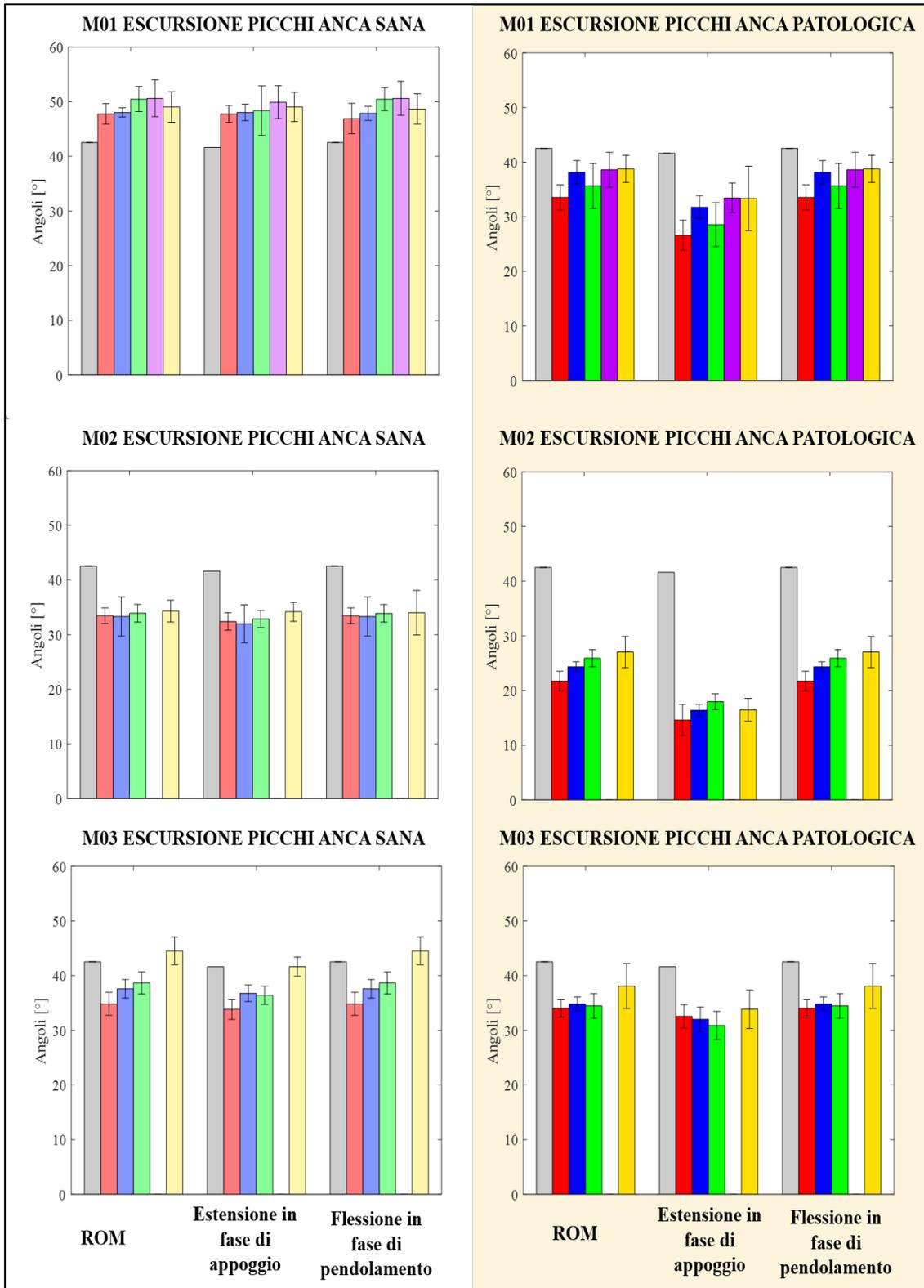


Figura 103. Misura di ROM articolare, estensione in fase di appoggio e flessione in fase di pendolamento alle varie visite, per anca sana ed anca patologica di M01, M02 ed M03. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia rappresenta il valore fisiologico.

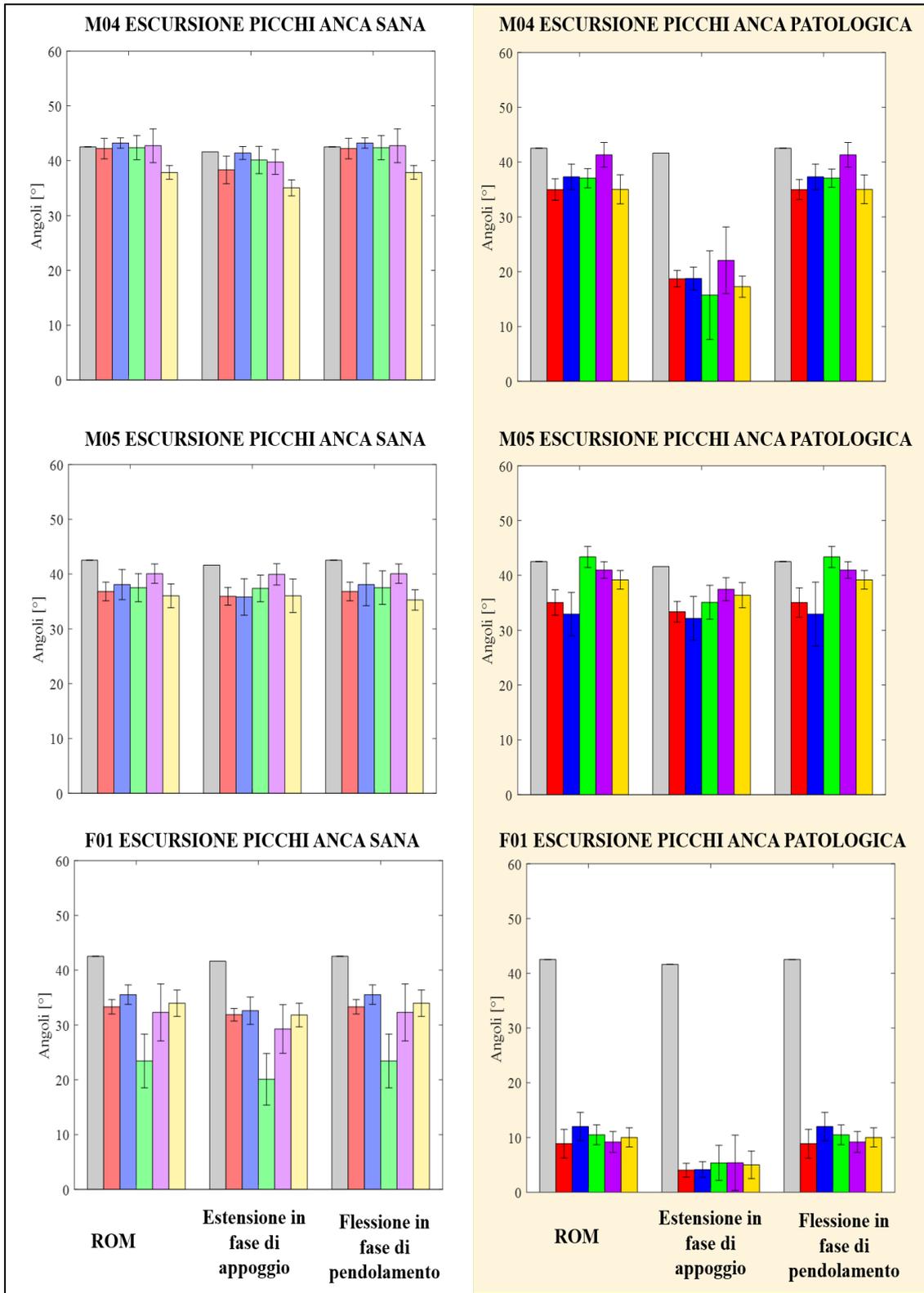


Figura 104. Misura di ROM articolare, estensione in fase di appoggio e flessione in fase di pendolamento alle varie visite, per anca sana ed anca patologica di M03, M04 ed M05. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia rappresenta il valore fisiologico.

In riferimento al ROM articolare, nel precedente capitolo si era visto come questo corrispondesse alla flessione in fase di pendolamento sia per l'arto patologico che per l'arto sano (ad eccezione dell'anca sana di M01 per il quale corrisponde all'estensione in fase di appoggio), e quindi la sua evoluzione risulterà corrispondente. Si riporta in **Figura 105**, sotto forma di istogramma, l'andamento del ROM medio dell'anca patologica e dell'anca sana per ogni visita.

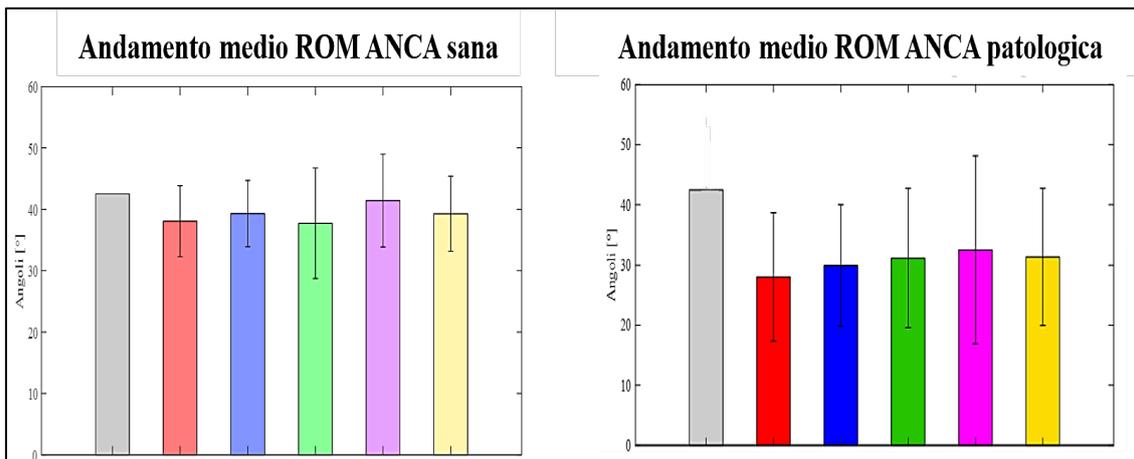


Figura 105. Andamento del ROM medio calcolato ad ogni visita per anca sana e anca patologica. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia rappresenta il valore fisiologico.

In generale, i principali miglioramenti per la cinematica dell'anca patologica dovuti all'effetto della tossina botulinica sono stati:

- Un avvicinamento dell'altezza dei punti significativi delle curve ai rispettivi valori fisiologici, in particolare:
 - il picco di flessione in fase di appoggio, con un avvicinamento massimo al valore fisiologico alla visita 2 per M02 e alla visita 1 per M04.
 - il picco di estensione in fase di appoggio, con un avvicinamento massimo al valore fisiologico alla visita 2 per F01, alla visita 3 per M04 e alla visita 4 per M05.
 - il picco di flessione in fase di pendolamento, con un avvicinamento massimo al valore fisiologico alla visita 2 per M02.
- Un avvicinamento della misura dell'estensione in fase di appoggio al suo valore fisiologico, con un massimo alla visita 2 per M02 ed F01, alla visita 3 per M01, M04 ed M05 e alla visita 4 per M03.
- Un avvicinamento della misura della flessione in fase di pendolamento al suo valore fisiologico, con un massimo alla visita 1 per F01, alla visita 2 per M05 e alla visita 4 per tutti gli altri.

Per quanto riguarda la cinematica dell'anca sana si sono avuti invece:

- Un avvicinamento del picco di estensione in fase di appoggio al suo valore fisiologico, con un massimo alla visita 4 per M02 ed M03, alla visita 1 per M04 ed F01 e alla visita 3 per M05.
- Un avvicinamento del picco di flessione in fase di pendolamento al suo valore fisiologico con un massimo alle visite 4, 3 ed 1 rispettivamente per M03, M05 ed F01.

6.2 Analisi della cinematica del ginocchio nel piano sagittale post-iniezione di tossina botulinica

Si riportano nelle **Figure 106, 107, 108, 109, 110 e 111** la cinematica per ginocchio sano e per ginocchio patologico dei sei pazienti. In tutte le figure, ogni colore è indicativo di una visita, in particolare: in rosso la Visita 0 (pre iniezione), in blu la Visita 1 (30 giorni dall'iniezione), in verde la Visita 2 (60 giorni dall'iniezione), in viola la Visita 3 (90 giorni dall'iniezione) ed in giallo la Visita 4 (120 giorni dall'iniezione). In grigio si riportano i valori fisiologici.

Come per l'anca, si riporta nelle **Figure 111 e 112** sotto forma di istogramma, il valore dei punti significativi della curva cinematica di ginocchio acquisito in corrispondenza delle singole visite.

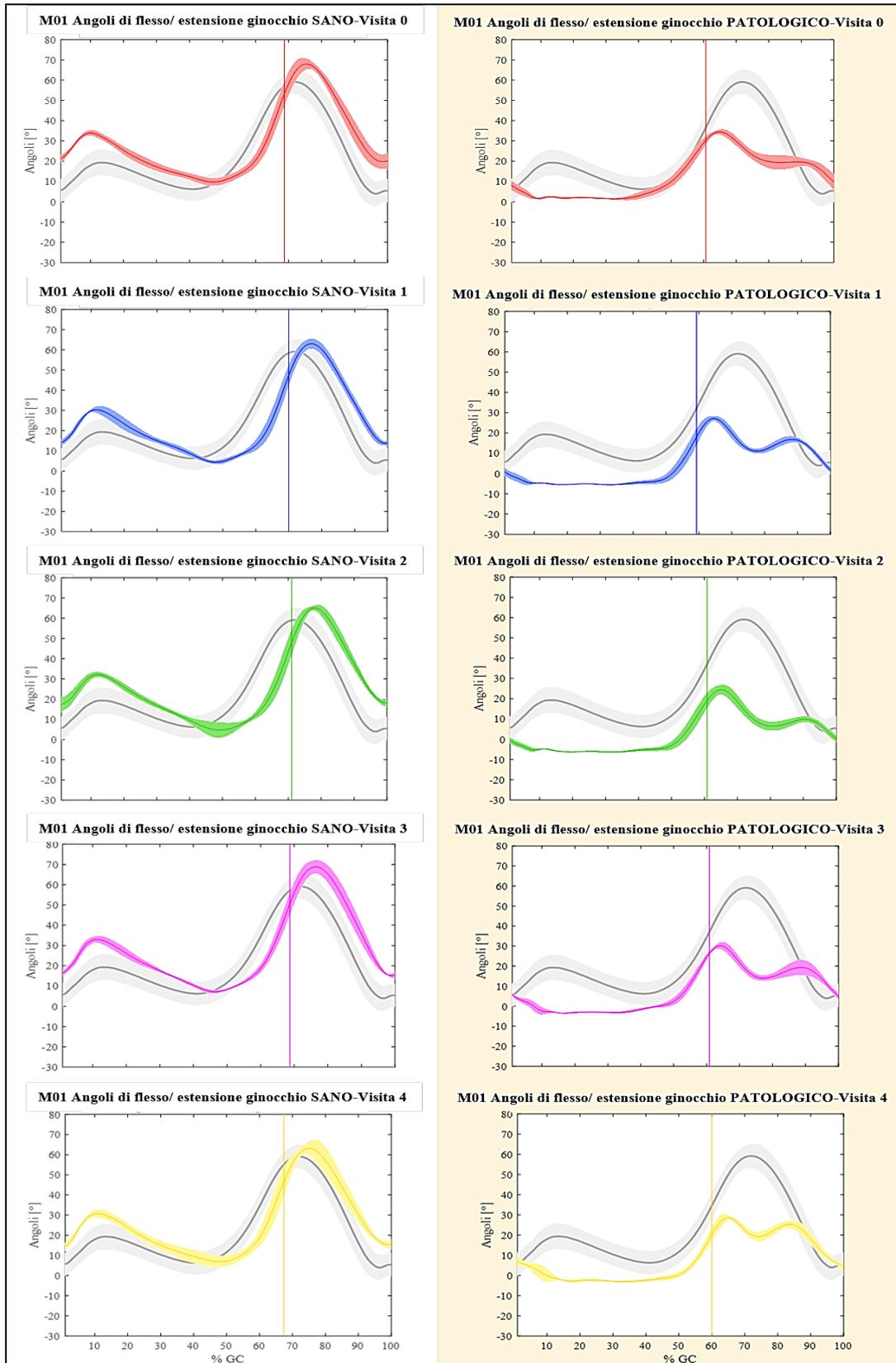


Figura 106 Angoli di flessione/estensione di ginocchio per entrambi gli arti di M01, prima dell'iniezione di tossina botulinica (Visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (Visite 1-4).

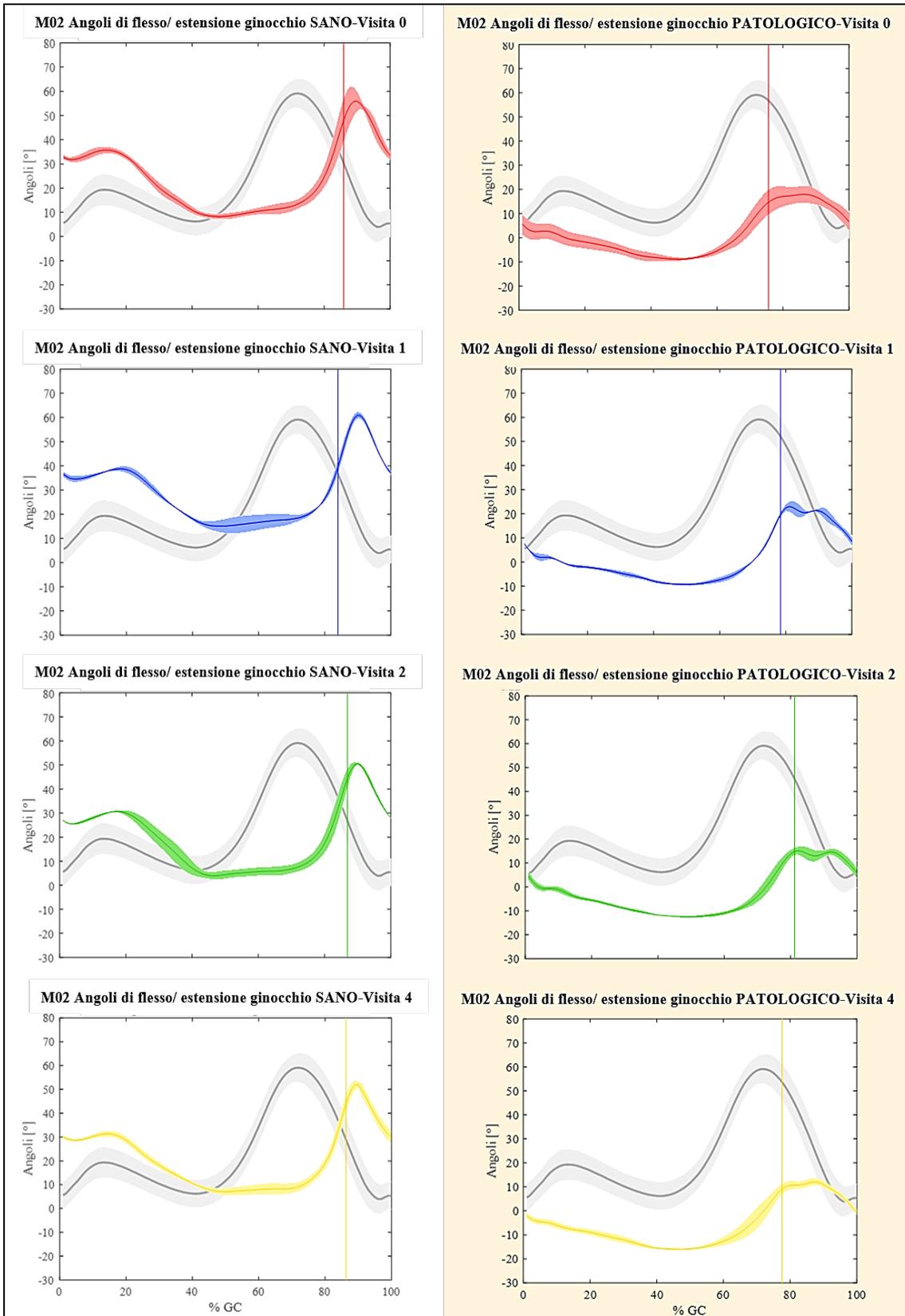


Figura 107 Angoli di flessione/ estensione di ginocchio per entrambi gli arti di M02, prima dell'iniezione di tossina botulinica (Visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (Visite 1-4).

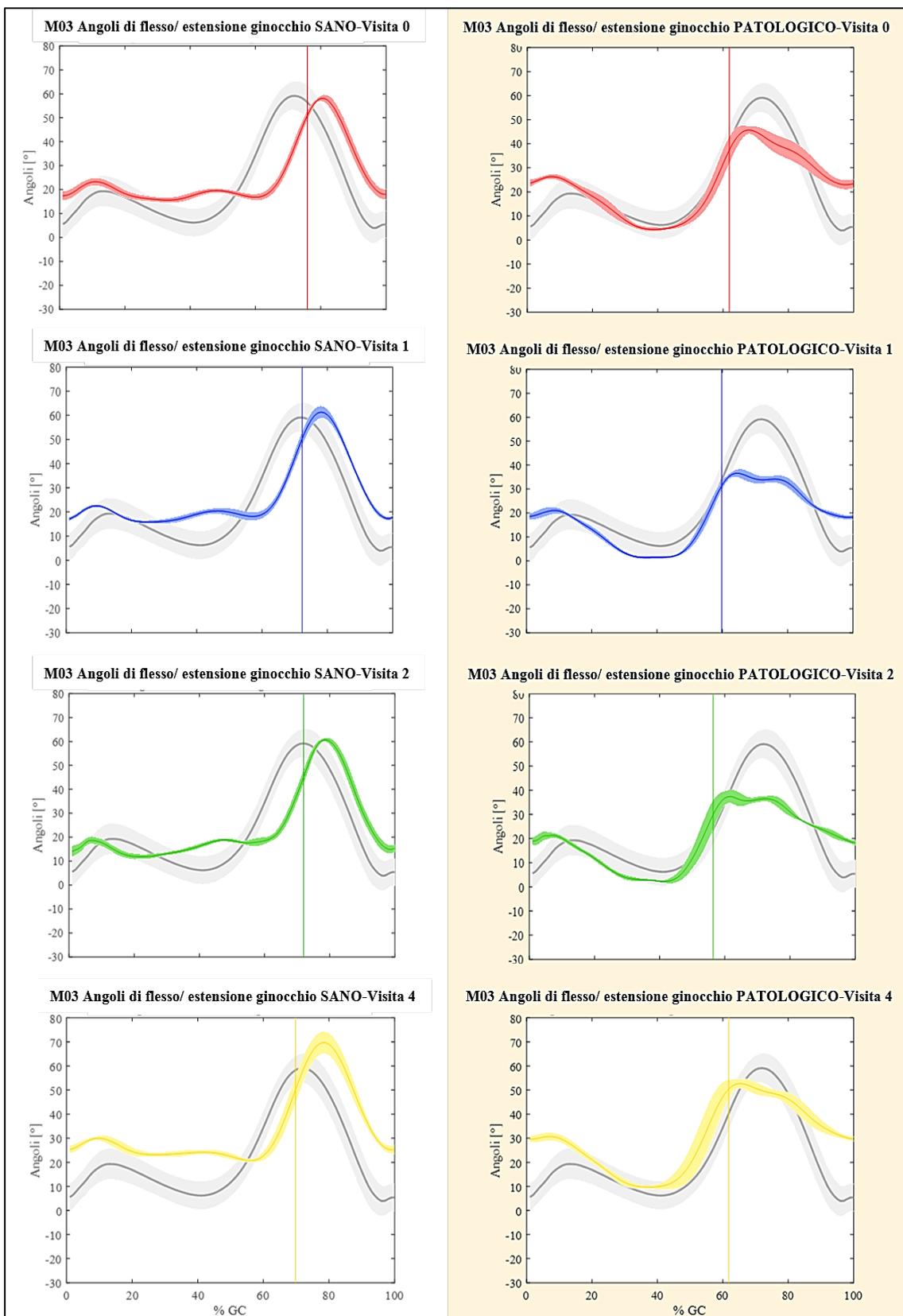


Figura 108. Angoli di flessione/estensione di ginocchio per entrambi gli arti di M03, prima dell'iniezione di tossina botulinica (Visita 0) e a distanza di 30, 60, 90 e 120 giorni (Visite 1-4).

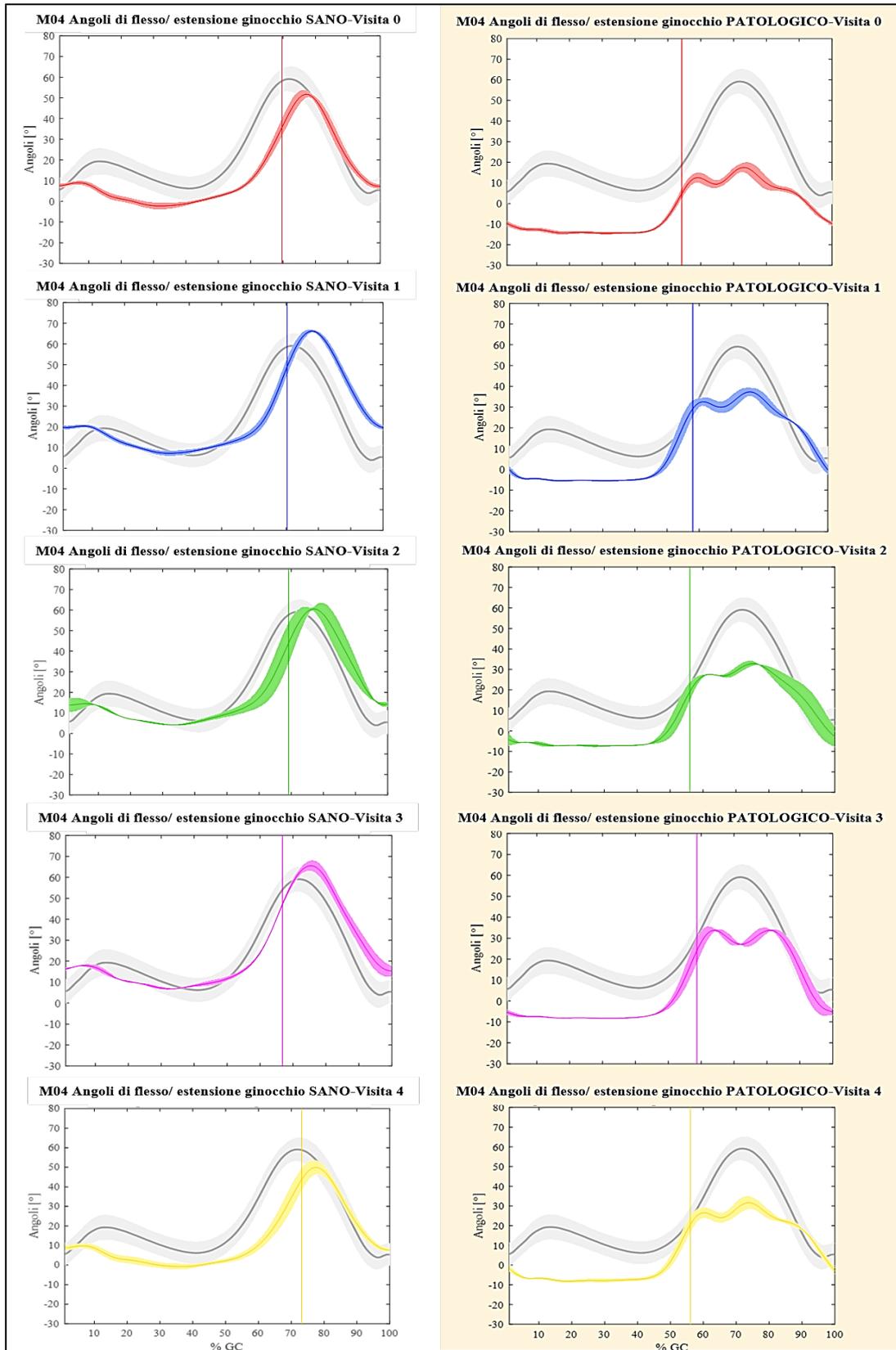


Figura 109. Angoli di flesso estensione di ginocchio per entrambi gli arti di M04, prima dell'iniezione di tossina botulinica (Visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (Visite 1-4).

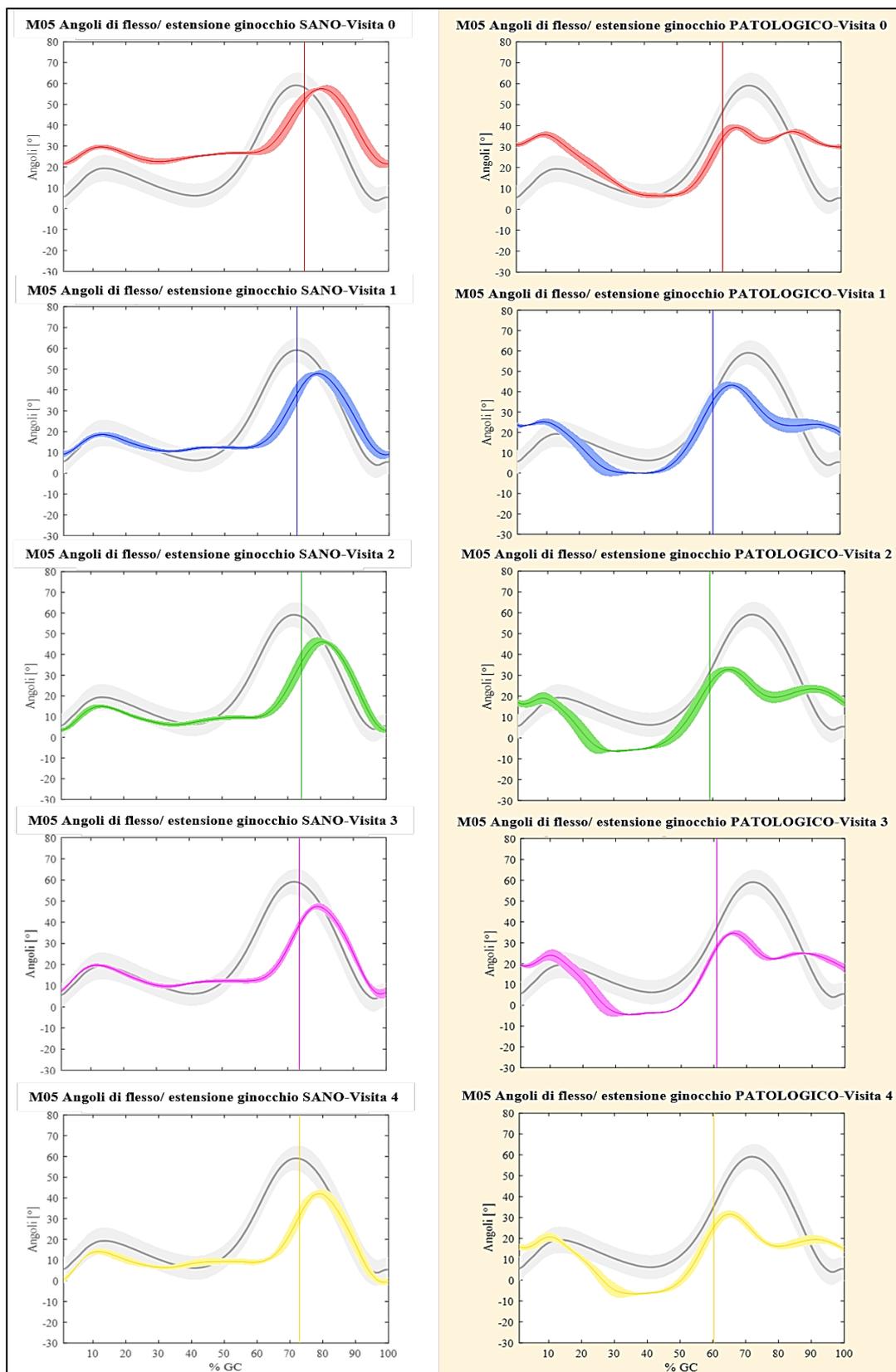


Figura 110. Angoli di flessione/estensione di ginocchio per entrambi gli arti di M05, prima dell'iniezione di tossina botulinica (Visita 0) e a distanza di 30, 60, 90 e 120 giorni (Visite 1-4).

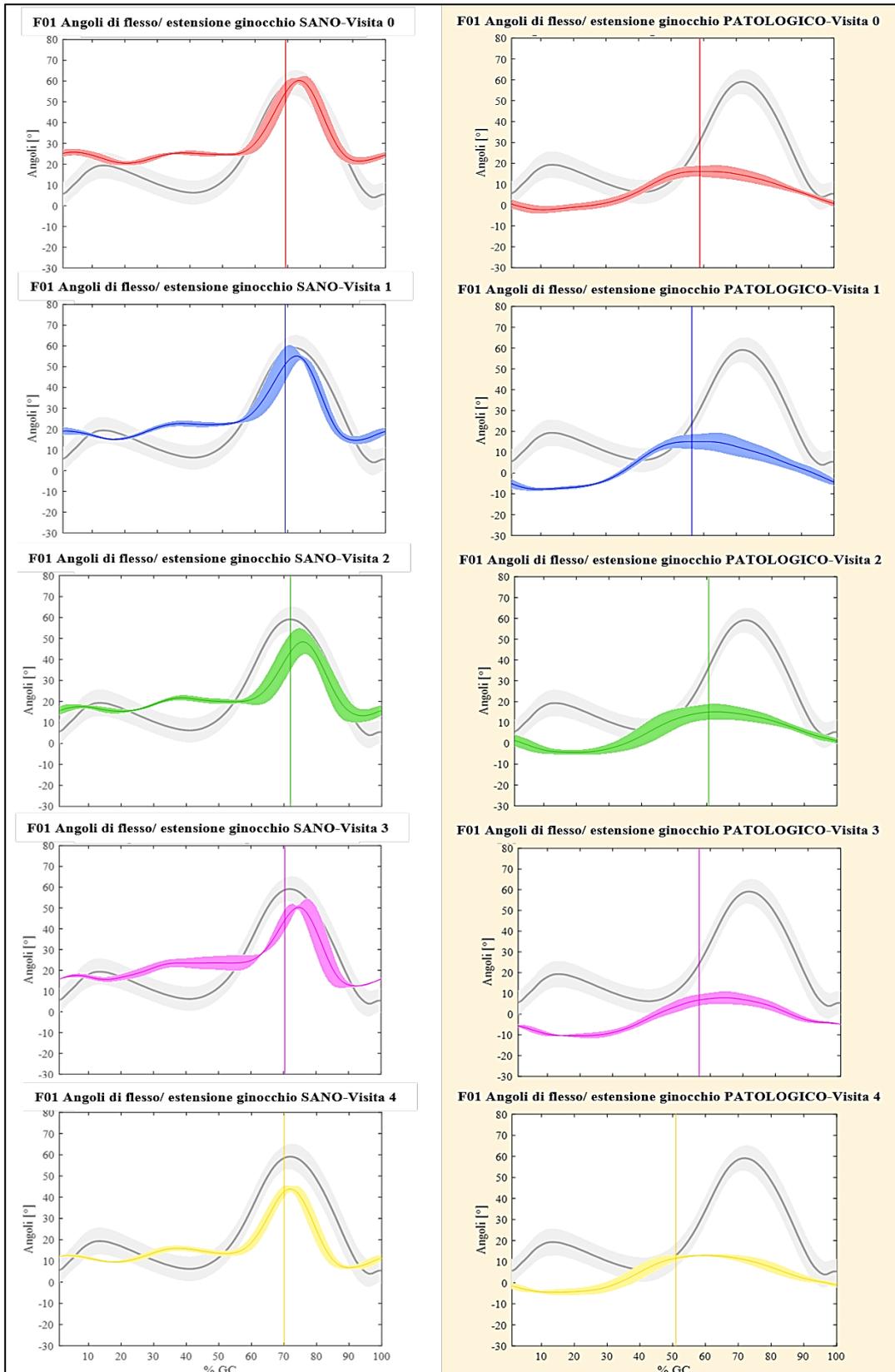


Figura 111. Angoli di flessio estensione di ginocchio per entrambi gli arti di F01, prima dell'iniezione di tossina botulinica (Visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (Visite 1-4).

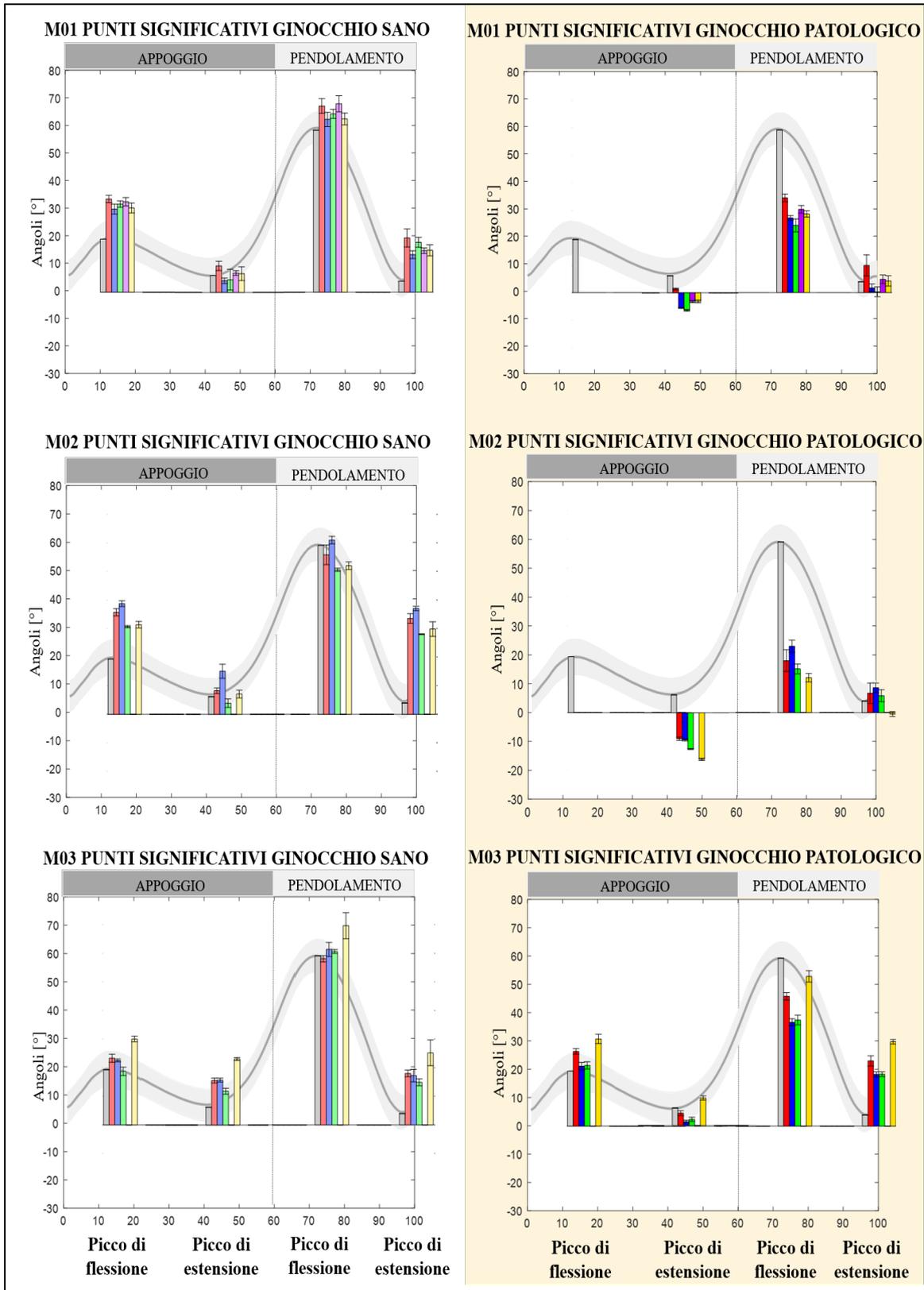


Figura 112 Valore dei punti significativi per la cinematica del ginocchio. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per Visita 0, blu per Visita 1, verde per Visita 2, Viola per Visita 3 e giallo per Visita 4. La barra grigia è il valore fisiologico del picco

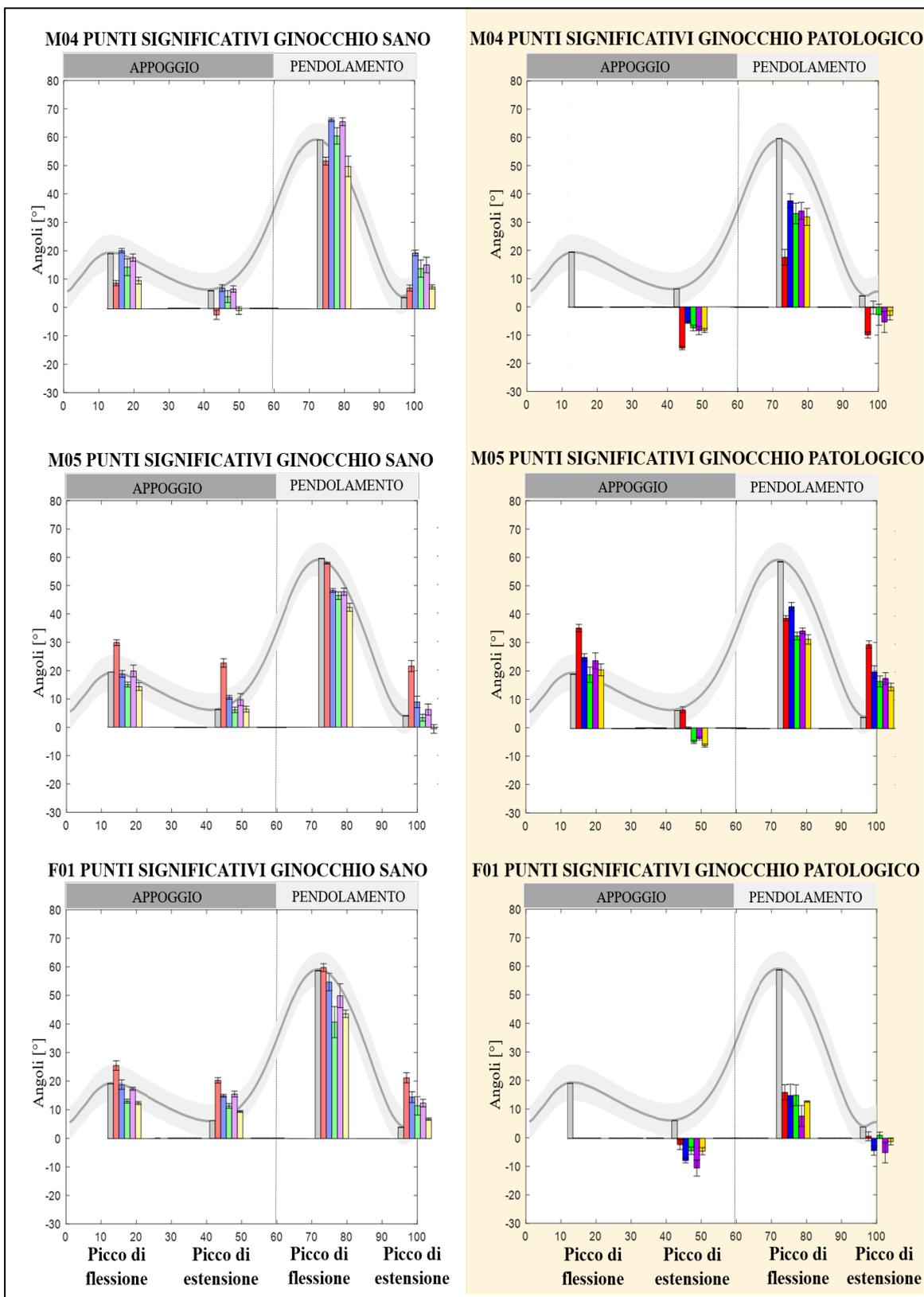


Figura 113 Valore dei punti significativi per la cinematica del ginocchio. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per Visita 0, blu per Visita 1, verde per Visita 2, Viola per Visita 3 e giallo per Visita 4. La barra grigia è il valore fisiologico del picco

Partendo dalla fase di appoggio, alla visita 0 la prima differenza tra la cinematica del ginocchio patologico e il rispettivo andamento fisiologico riguardava l'assenza del picco di flessione, che alla visita 0 mancava per tutti i pazienti ad eccezione di M03 ed M05. Dalle **Figure 112 e 113** si vede come la tossina botulinica non abbia sortito effetti in questo senso, in quanto il picco non si presenta per nessuno dei pazienti precedentemente citati in nessuna delle visite post iniezione. Invece, per i pazienti che alla visita 0 presentavano il picco di flessione in appoggio, questo risultava essere posizionato più in alto rispetto al range fisiologico per entrambi, e guardando le **Figure 112 e 113** si vede come per M03 vi sia un abbassamento con avvicinamento massimo al fisiologico (e rientro nel range come si vede in **Figura 108**) in corrispondenza della visita 1, seguito però da un nuovo allontanamento in corrispondenza della visita 4, mentre per M05 vi è una graduale diminuzione con avvicinamento massimo al valore fisiologico in corrispondenza della visita 2.

Sempre nel precedente capitolo, per i pazienti M02, M04 ed F01 per l'arto patologico era stata notata una iper-estensione di ginocchio in fase di appoggio alla visita 0. Dalle **Figure 112 e 113** è evidente che alle visite successive questo aspetto peggiora, in quanto per i pazienti appena citati la curva scende ulteriormente, allontanandosi maggiormente dal range fisiologico, mentre per i pazienti che inizialmente non mostravano tale iper-estensione, essa compare alle visite successive.

Una ulteriore differenza rilevata alla visita 0 per la cinematica del ginocchio patologico di tutti i pazienti riguardava l'altezza del picco di flessione in fase di pendolamento, il quale risultava posizionato più in basso rispetto al fisiologico. Come si può vedere dalle **Figure 112 e 113**, per tutti i pazienti ad eccezione di F01 ed M01, il picco sale, raggiungendo il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 1 per i pazienti M02, M04 ed M05 e della visita 4 per il paziente M03 (ma non rientrando mai comunque nel range fisiologico). Al contrario, nel caso di F01 ed M01, l'altezza del picco di flessione diminuisce, raggiungendo il valore più distante dal range fisiologico in corrispondenza della visita 2 per M01 e della visita 3 per F01.

Altre differenze, sempre per l'arto patologico alla visita 0 riguardano: il picco di estensione in fase di pendolamento, più alto del fisiologico per i pazienti M03 ed M05, il quale diminuisce raggiungendo il valore più vicino al fisiologico alla visita 2 per M03 e alla visita 4 per M05 (ma non rientrando mai comunque nel range fisiologico), e l'iper estensione in fase di pendolamento di M04, la quale diminuisce raggiungendo il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 1 (rientrando nel range fisiologico come si vede dalla **Figura 109**).

Per quanto riguarda l'arto sano, la prima differenza emersa alla visita 0 rispetto al fisiologico era il picco di flessione in fase di appoggio più alto del range, per i pazienti M01, M02, ed M05 e più basso per M04. Dalle **Figure 112 e 113** si vede come questo subisca un abbassamento raggiungendo il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 1 per M01, della visita 3 per M05, della visita 2 per M02, ed un innalzamento con valore più vicino al fisiologico per M04 in corrispondenza della visita 1 (solo per M04 ed M05 i valori rientrano nel range fisiologico, come si vede dalle **Figure 109 e 110**).

Nel caso del picco di estensione in fase di appoggio, che alla visita 0 risultava al di sotto del range fisiologico per M04 ed al di sopra per F01, M05 ed M03, anch'esso subisce un abbassamento, raggiungendo il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 2 per M03 ed M05 (rientrando nel range fisiologico solo per quest'ultimo, come si vede da **Figura 110**) e della visita 4 per F01, mentre per M04 l'iper estensione scompare dalla visita 1 alla visita 3, lasciando il posto ad un picco di estensione con altezza compresa all'interno del range fisiologico.

Per quanto riguarda il picco di flessione in pendolamento, che alla visita 0 risultava interno al range fisiologico per tutti i pazienti, questo subisce un abbassamento per M02, M05 ed F01, con conseguente uscita dal range fisiologico in corrispondenza rispettivamente delle visite 2, 1 e 4 (**Figure 107, 110 e 111**), ed un innalzamento per i pazienti M03 ed M04 con conseguente uscita dal range fisiologico in corrispondenza rispettivamente delle visite 4 e 1 (**Figure 108 e 109**).

Infine il picco di estensione in pendolamento, il quale alla visita 0 risultava posizionato più in alto rispetto al range fisiologico per tutti i pazienti ad eccezione di M04, risulta anch'esso diminuire, raggiungendo il valore più vicino al fisiologico alla visita 1 per M01, alla visita 2 per M02, M03 ed M05 e alla visita 4 per F01 (rientrando nel range fisiologico solo per F01 ed M05, come si vede dalle **Figure 110 e 111**).

Come per la cinematica d'anca, anche per il ginocchio un ulteriore effetto della tossina botulinica sulle curve riguarda la variazione delle altezze relative tra i punti significativi, si riportano quindi nelle **Figure 114 e 115**, sotto forma di istogrammi, le escursioni tra i picchi significativi della cinematica del ginocchio misurate ad ogni visita, unitamente al ROM articolare.

Le differenze notate in corrispondenza della visita 0 per le escursioni tra punti significativi del ginocchio patologico rispetto alle escursioni fisiologiche erano: una minore flessione ed una minore estensione in fase di pendolamento per tutti i pazienti. Per i soli due pazienti che presentavano il picco di flessione in fase di appoggio, M03 ed M05, si era

anche notato come l'escursione misurata tra quest'ultimo ed il successivo picco di estensione fosse maggiore rispetto al fisiologico.

Come si può vedere dalle **Figure 114 e 115**, la flessione in fase di pendolamento subisce un aumento, raggiungendo il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 1, per i pazienti M02, M04, M05 ed F01 e della visita 4 per M03. Bisogna però sottolineare come per M03 prima della visita 4 vi sia un allontanamento dal valore fisiologico con un massimo in corrispondenza della visita 1. Per M01 invece si ha una ulteriore diminuzione con il raggiungimento della distanza massima dal valore fisiologico in corrispondenza della visita 2.

Sempre in fase di pendolamento, anche l'estensione subisce un aumento, raggiungendo il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 1 per M02, M05 ed F01, ed in corrispondenza della visita 3 per M01 ed M04. Per M03 invece diminuisce ulteriormente, con il valore più distante dal fisiologico raggiunto in corrispondenza della visita 1, per poi ritornare, alla visita 4, ad un valore molto simile a quello registrato per la visita 0. Per i pazienti M03 ed M05, si ha anche un miglioramento dal punto di vista dell'escursione tra il picco di flessione ed il picco di estensione in fase di appoggio, che diminuisce raggiungendo il valore più vicino all'estensione fisiologica in corrispondenza della visita 2.

Nel caso del ginocchio sano invece, sempre in riferimento alle escursioni tra picchi significativi, la prima differenza con l'andamento fisiologico notata alla visita 0 era una minore estensione in appoggio per M03, M04, M05 ed F01, ed un valore maggiore per M01 ed M02. Dalle **Figure 114 e 115** si vede come questa per i pazienti M03 ed F01 diminuisca, allontanandosi ulteriormente dal fisiologico, mentre cresce per i pazienti M04 ed M05, raggiungendo il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza rispettivamente della visita 1 e della visita 3. M01 ed M02 alla visita 0 mostravano un valore di estensione in appoggio maggiore del fisiologico. M02 mostra una diminuzione per, che raggiunge il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 1. M01, dopo un iniziale aumento con allontanamento dal fisiologico, alla visita 4 presenta un valore minore rispetto a quello registrato alla visita 0, e quindi anche in questo caso vi è un miglioramento.

La seconda differenza rispetto al fisiologico era la minore flessione in pendolamento per tutti i pazienti ad eccezione di M01 ed M04 (per M01 risultava maggiore e per M04 quasi uguale). Essa aumenta raggiungendo il valore più vicino al fisiologico alla visita 2 per M03 ed M05 e allontanandosi invece dal fisiologico per M04 (**Figure 114 e 115**). Per M02 si ha invece un abbassamento del valore di flessione ed un conseguente allontanamento di quest'ultimo dal fisiologico, mentre per F01 c'è un iniziale

innalzamento alla visita 1 che permette di raggiungere il valore più vicino al fisiologico, e poi come per M02 una discesa che lo allontana. Per M01, il quale presentava un valore di flessione maggiore rispetto al fisiologico in corrispondenza della visita 0, questo cresce ulteriormente, allontanandosi dal fisiologico e raggiungendo il suo massimo alla visita 3, per poi decrescere alla visita 4, raggiungendo un valore più vicino al fisiologico di quello registrato alla visita 0, e quindi mostrando un miglioramento.

Infine l'ultima differenza era una minore estensione in fase di pendolamento per tutti i pazienti rispetto al fisiologico: nelle **Figura 114 e 115** si nota come aumenti per tutti, raggiungendo il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 3 per M01 ed M04, della visita 1 per M02 ed F01 e della visita 2 per M03 ed M05.

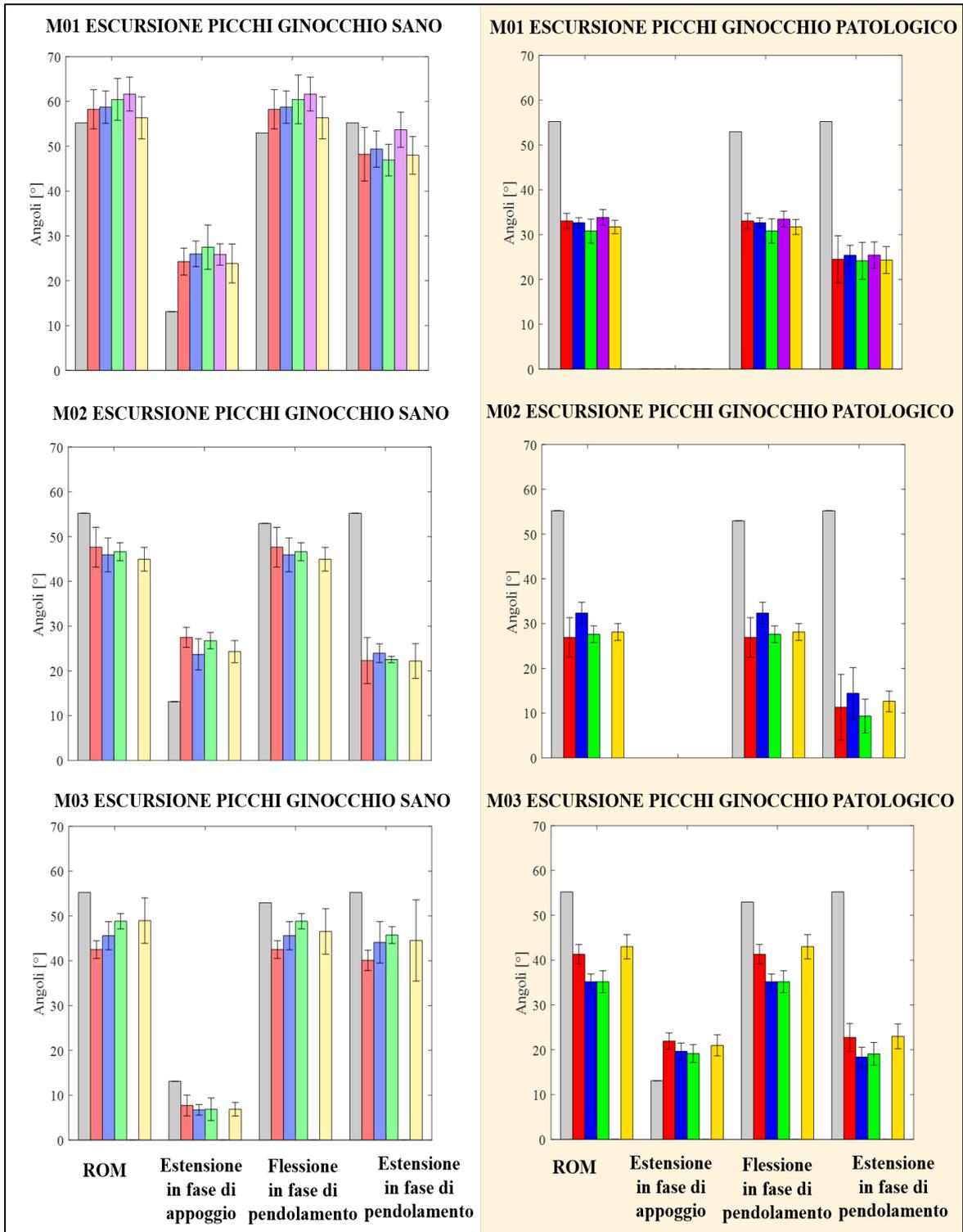


Figura 114. Misura di ROM articolare, estensione in fase di appoggio e flessione ed estensione in fase di pendolamento alle varie visite, per ginocchio sano e ginocchio patologico di M01, M02 ed M03. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per Visita 0, blu per Visita 1, verde per Visita 2, Viola per Visita 3 e giallo per Visita 4. La barra grigia rappresenta il valore fisiologico

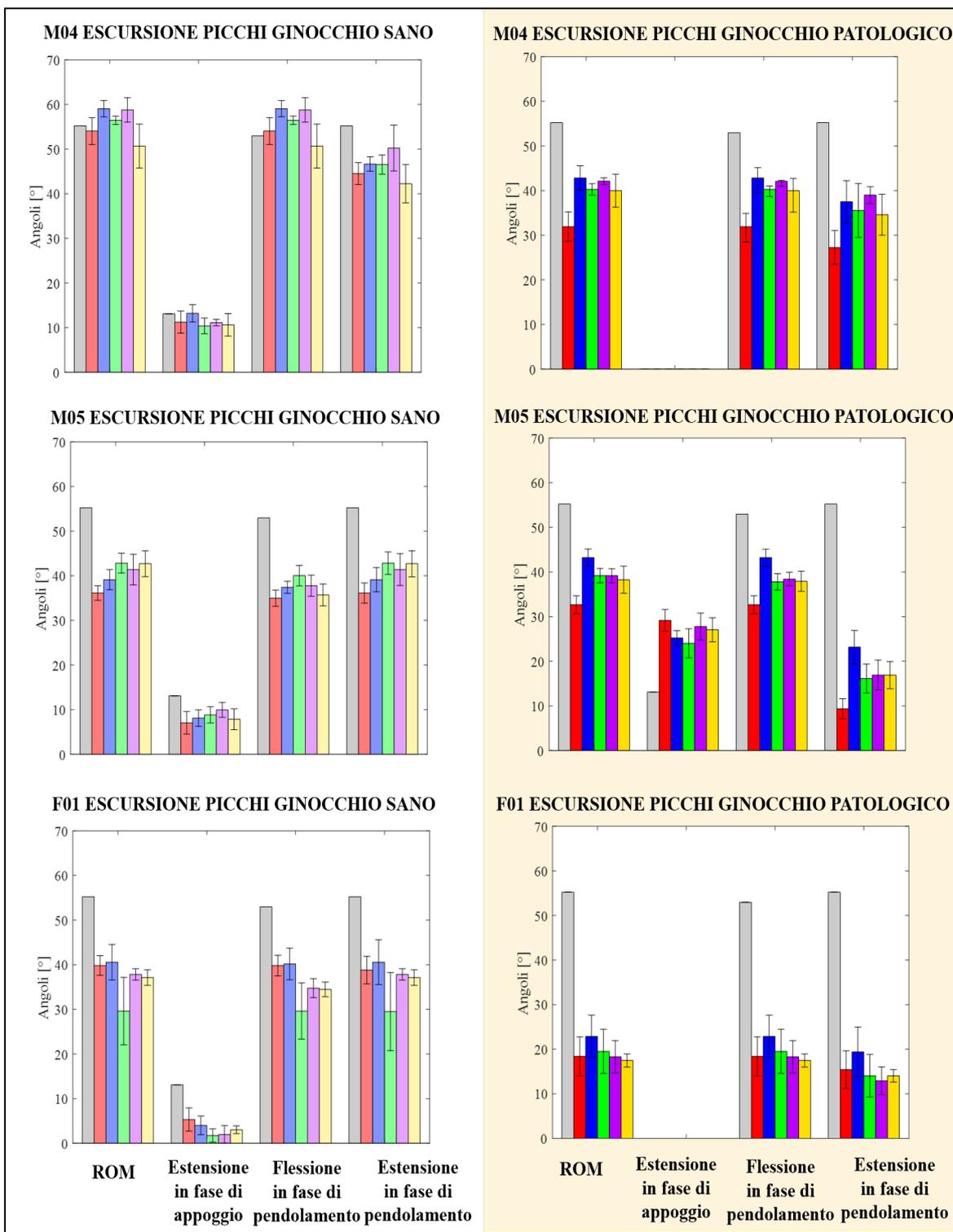


Figura 115. Misura di ROM articolare, estensione in fase di appoggio e flessione ed estensione in fase di pendolamento alle varie visite, per ginocchio sano e ginocchio patologico di M04, M05 ed F01. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per Visita 0, blu per Visita 1, verde per Visita 2, Viola per Visita 3 e giallo per Visita 4. La barra grigia rappresenta il valore fisiologico.

Per il ginocchio patologico, il ROM articolare corrisponde per tutti i pazienti alla flessione in fase di pendolamento, e quindi la sua evoluzione nel tempo sarà la medesima. Nel caso dell'arto sano invece fanno eccezione: M05, per il quale il ROM (e anche la sua evoluzione) corrisponde all'estensione in fase di pendolamento, ed M03 per il quale in corrispondenza della visita 4, a causa della forma assunta dalla curva, il ROM e la flessione in pendolamento risultano diversi, in particolare la flessione diminuisce rispetto alla visita precedente mentre il ROM rimane costante. Si riporta in **Figura 116** forma di istogramma, l'andamento del ROM medio del ginocchio patologico e del ginocchio sano per ogni visita.

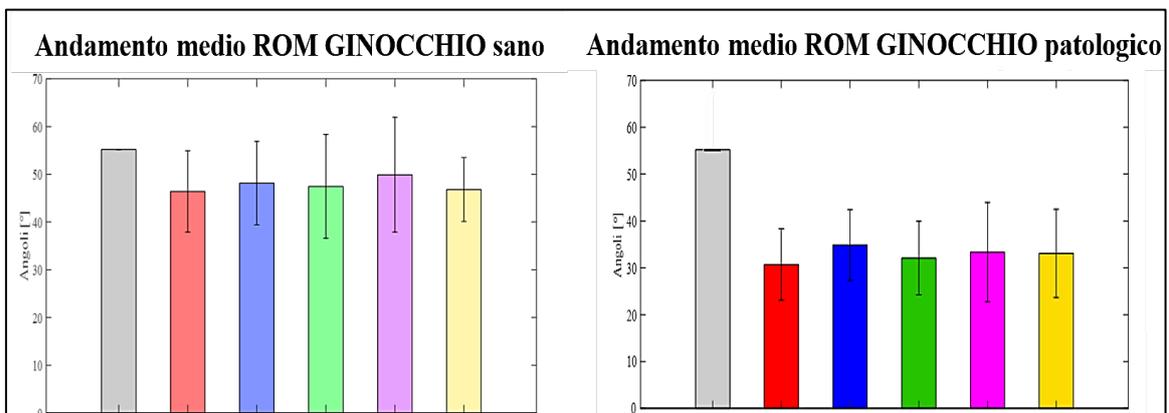


Figura 116. Andamento del ROM medio calcolato ad ogni visita per ginocchio sano e ginocchio patologico. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia rappresenta il valore fisiologico.

I principali miglioramenti per la cinematica del ginocchio patologico dovuti all'effetto della tossina botulinica sono stati:

- Un avvicinamento dell'altezza dei punti significativi delle curve ai rispettivi valori fisiologici, in particolare:
 - il picco di flessione in fase di appoggio con un avvicinamento massimo al valore fisiologico alla visita 1 per M03 e alla visita 2 per M05
 - il picco di flessione in fase di pendolamento, con un avvicinamento massimo al valore fisiologico alla visita 1 per M02 ed M04 e alla visita 4 per M03.
 - il picco di estensione in fase di pendolamento, con un avvicinamento massimo al valore fisiologico alla visita 1 per M03 e M04 e alla visita 4 per M05.
- Un avvicinamento della misura dell'estensione in fase di appoggio al suo valore fisiologico, con un massimo alla visita 2 per M03 ed M05.

- Un avvicinamento della misura della flessione in fase di pendolamento al suo valore fisiologico, con un massimo alla visita 1 per M02, M04, M05 ed F01 e alla visita 4 per M03.
- Un avvicinamento della misura dell'estensione in fase di pendolamento al suo valore fisiologico, con un massimo alla visita 1 per M01, M02, M05 ed F01 e alla visita 3 per M04.

Per quanto riguarda la cinematica del ginocchio sano si sono avuti invece:

- Un avvicinamento dell'altezza dei punti significativi delle curve ai rispettivi valori fisiologici, in particolare:
 - Il picco di flessione in fase di appoggio, con un avvicinamento massimo al valore fisiologico alla visita 1 per M01 ed M05, alla visita 2 per M02 e alla visita 1 per M04
 - Il picco di estensione in fase di appoggio con un avvicinamento massimo al valore fisiologico alla visita 2 per M03 ed M05 e alla visita 4 per F01.
 - Il picco di estensione in fase di pendolamento, con un avvicinamento massimo al valore fisiologico alla visita 1 per M01, alla visita 2 per M02 ed M03 e alla visita 4 per M05 ed F01.
- Un avvicinamento della misura dell'estensione in fase di appoggio al suo valore fisiologico, con un massimo alla visita 1 per M04 e alla visita 3 per M05
- Un avvicinamento della misura della flessione in fase di pendolamento al suo valore fisiologico, con un massimo alla visita 2 per M03 ed M05.
- Un avvicinamento della misura dell'estensione in fase di pendolamento al suo valore fisiologico, con un massimo alla visita 1 per M02 ed F01, alla visita 2 per M03 ed M05 e alla visita 3 per M01 ed M04.

6.3 Analisi della cinematica della caviglia nel piano sagittale post-iniezione di tossina botulinica

Si riportano nelle **Figure 117, 118, 119, 120, 121 e 122** la cinematica della caviglia sana e della caviglia patologica di tutti e sei pazienti. In tutte le figure ogni colore è indicativo di una visita, in particolare: in rosso la Visita 0 (pre iniezione), in blu la Visita 1 (30 giorni dall'iniezione), in verde la Visita 2 (60 giorni dall'iniezione), in viola la Visita 3 (90 giorni dall'iniezione) ed in giallo la Visita 4 (120 giorni dall'iniezione). In grigio si riportano i valori fisiologici.

Nuovamente la prima differenza tra le curve cinematiche e l'andamento fisiologico riguarda il valore assunto dai punti significativi, che si riporta nelle **Figure 123 e 124** sotto forma di istogramma.

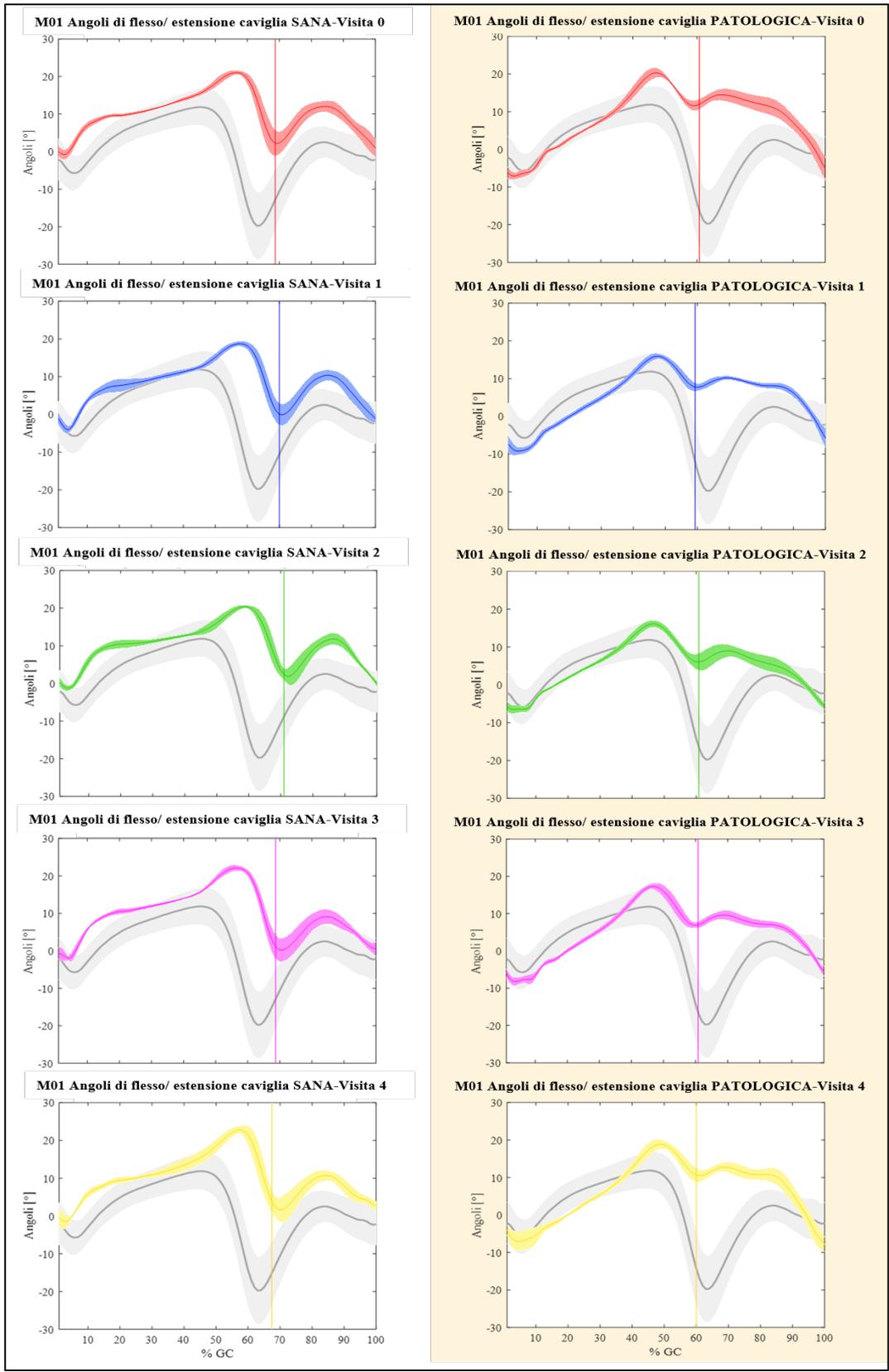


Figura 117. Angoli di dorsiplantiflessione di caviglia per entrambi gli arti di M01, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

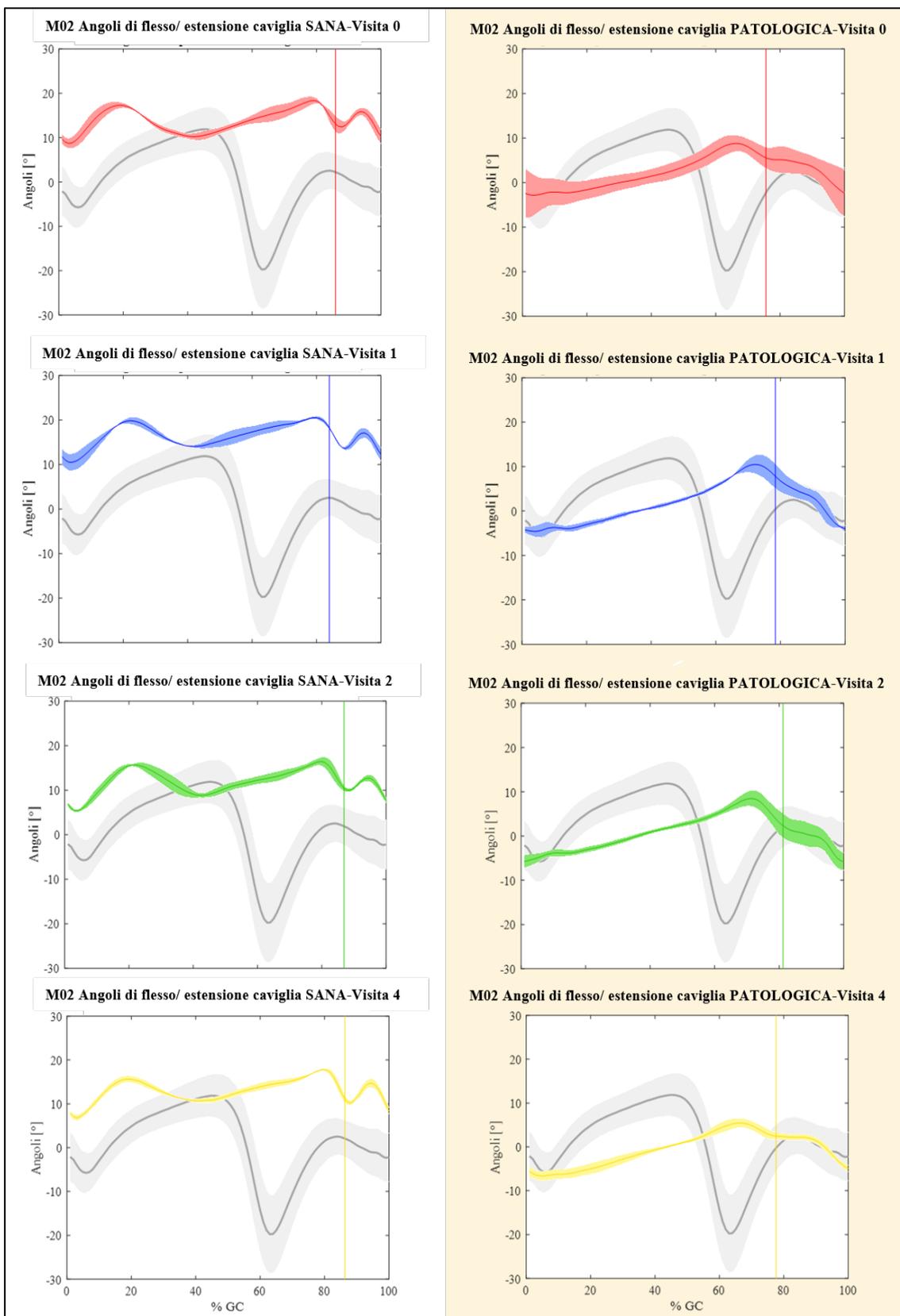


Figura 118. Angoli di dorsi-plantiflessione di caviglia per entrambi gli arti di M02, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

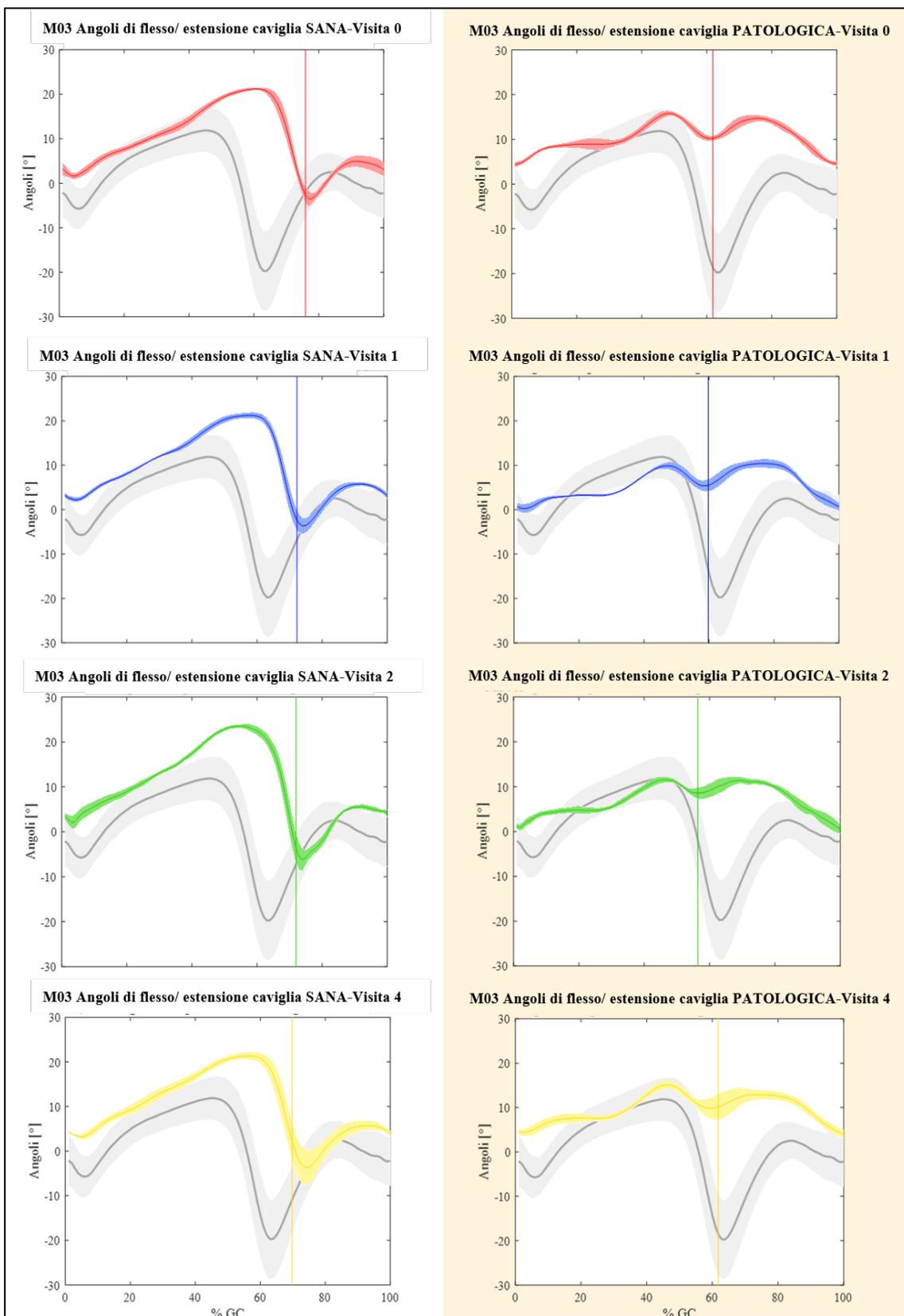


Figura 119. Angoli di dorsoplantiflessione di caviglia per entrambi gli arti di M03, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

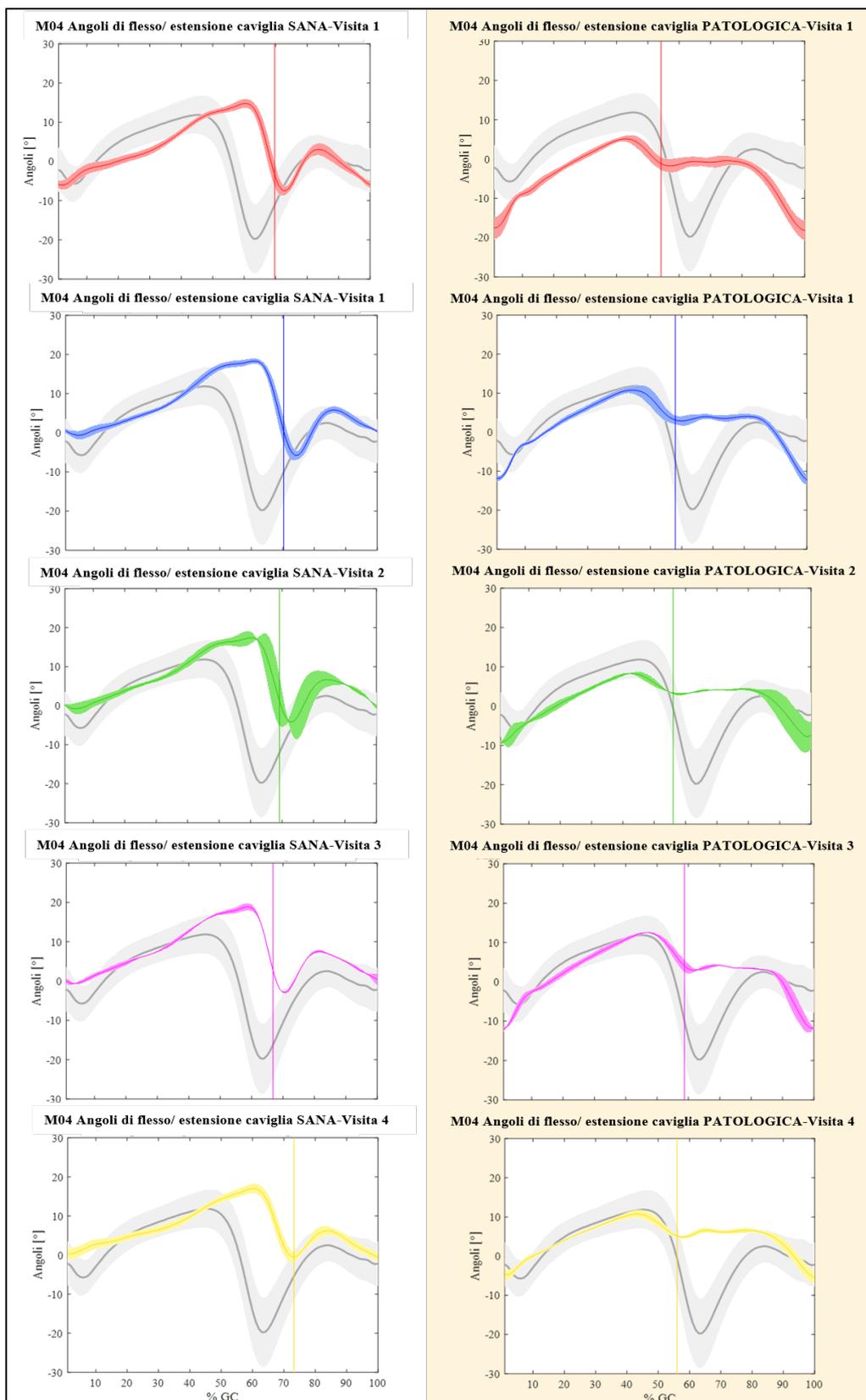


Figura 120. Angoli di dorsiflessione di caviglia per entrambi gli arti di M04, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

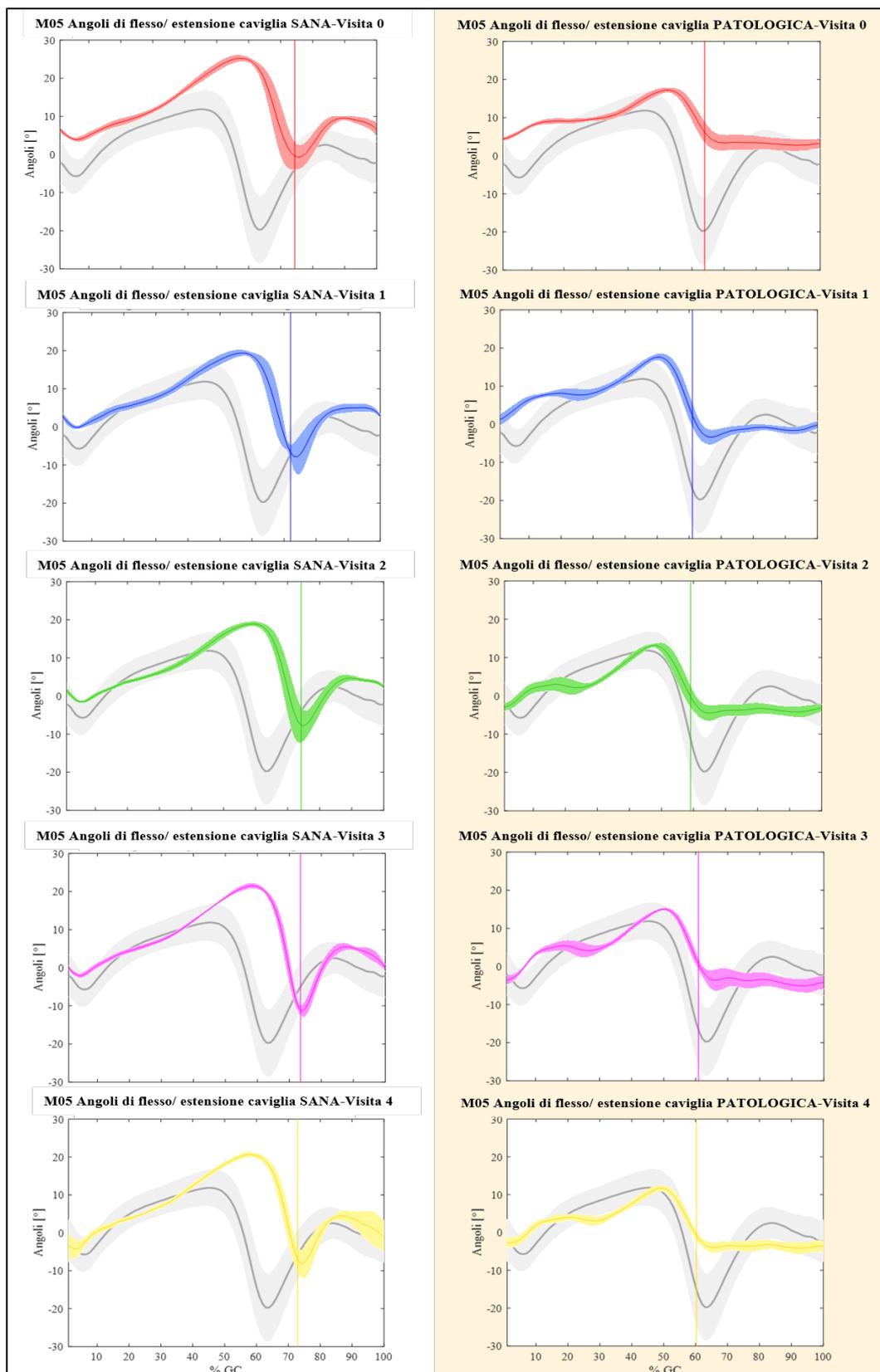


Figura 121. Angoli di dorsiflessione di caviglia per entrambi gli arti di M05, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

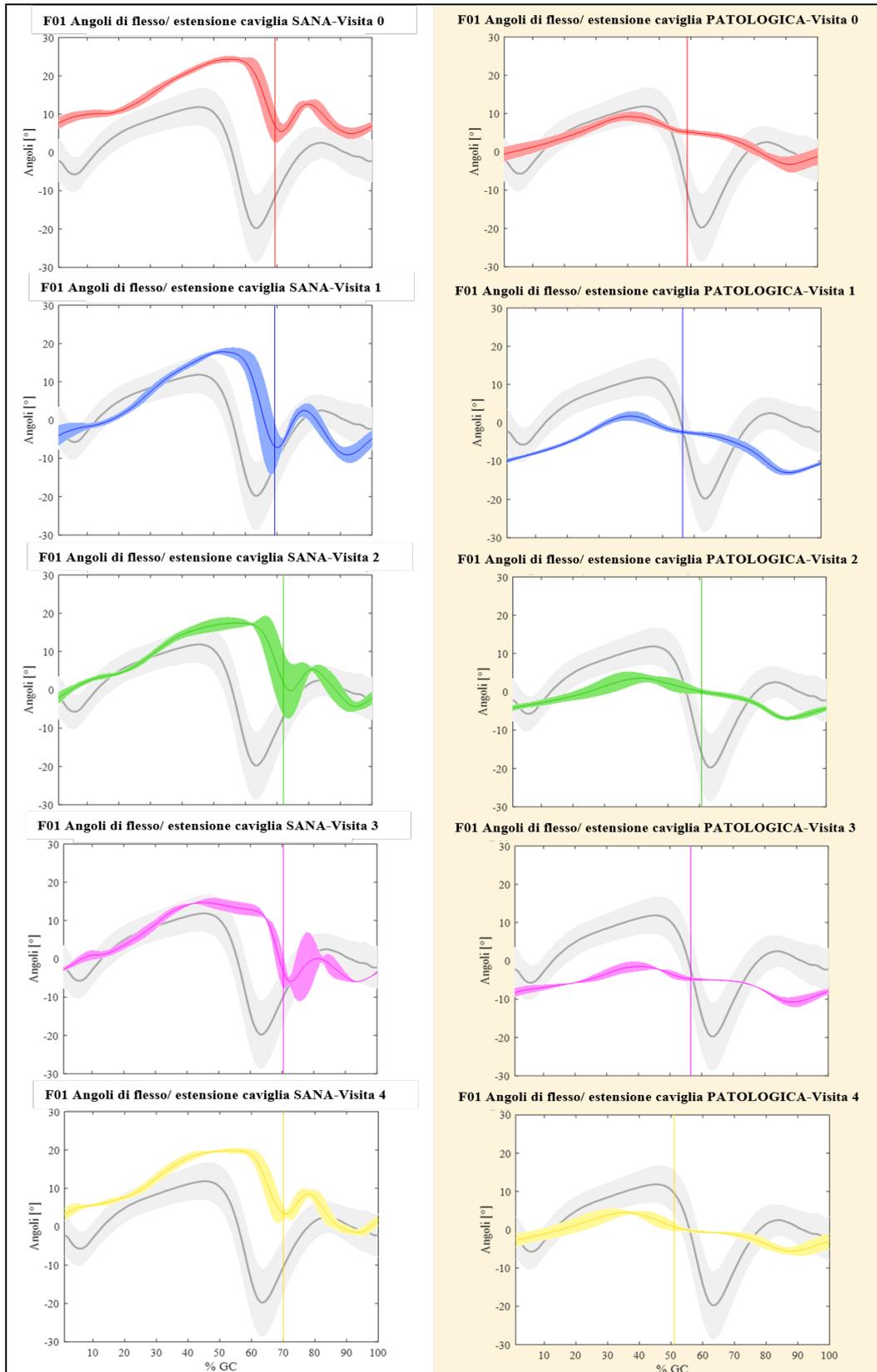


Figura 122. Angoli di dorsi-plantiflessione di caviglia per entrambi gli arti di F01, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

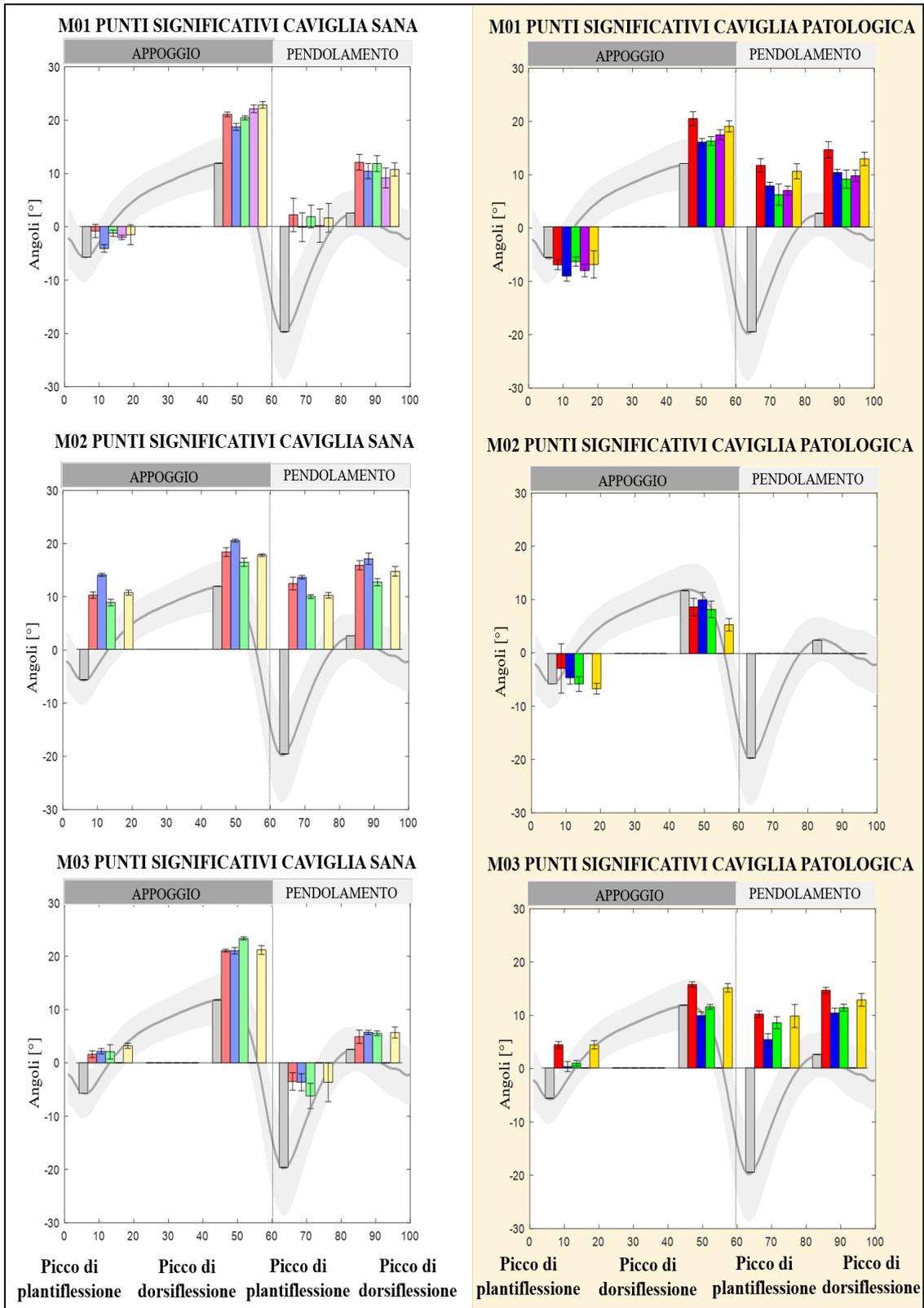


Figura 123. Valore dei punti significativi per la cinematica della caviglia. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia è il valore fisiologico del picco.

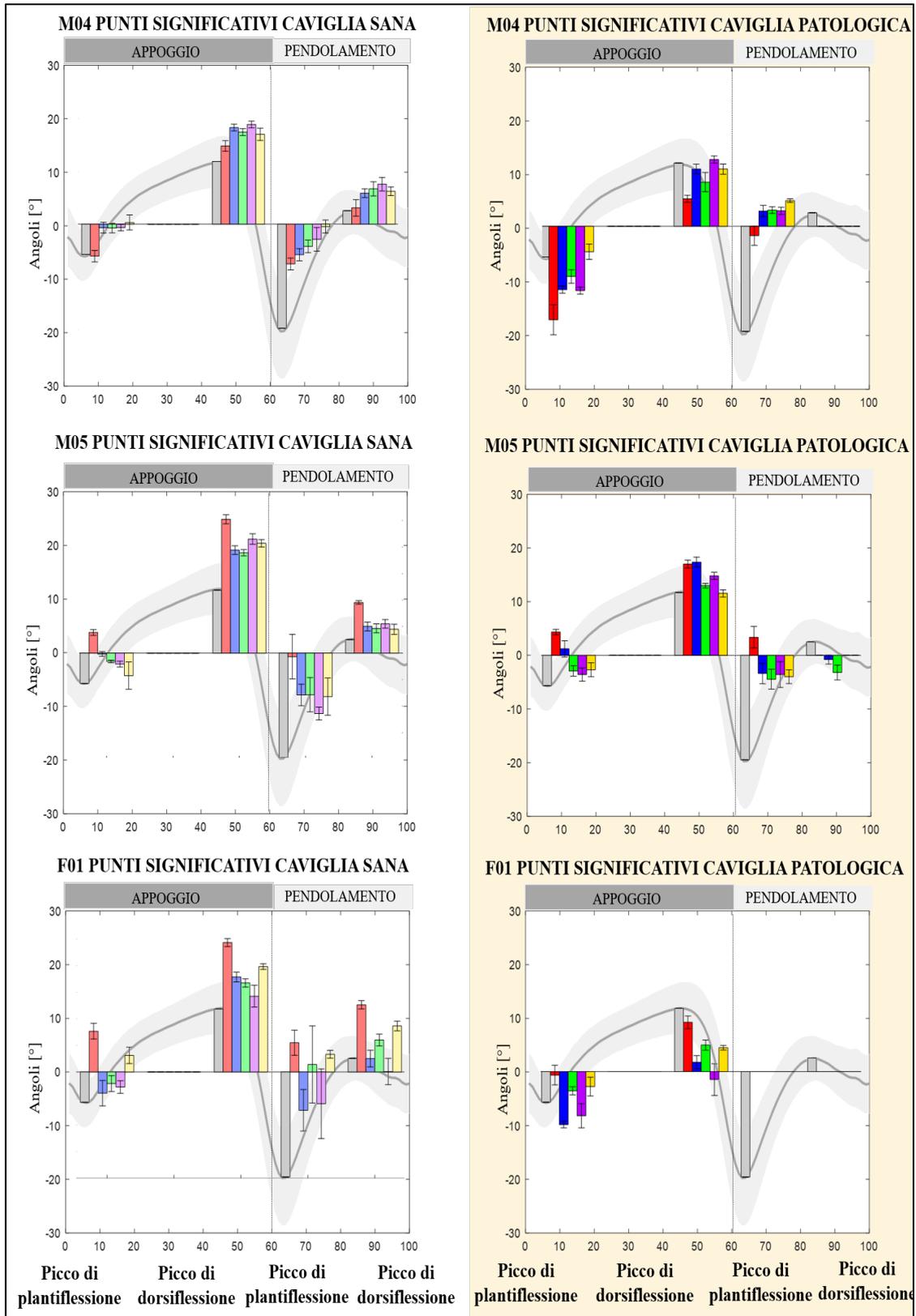


Figura 124. Valore dei punti significativi per la cinematica della caviglia. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia è il valore fisiologico del picco.

Per quanto riguarda la caviglia patologica, la prima differenza evidenziata alla visita 0 riguardava l'altezza del picco di plantiflessione in fase di appoggio che per i pazienti M05 ed M03 risultava più alto del range fisiologico mentre per M04 risultava più basso: dalle **Figure 123 e 124** si nota come per M03 ed M05 questo si sia abbassato, raggiungendo il valore più vicino al fisiologico rispettivamente in corrispondenza delle visite 1 e 3 (ma rientrando nel range fisiologico solo per M05, come si vede dalla **Figura 121**), mentre per il paziente M04 sia aumentato raggiungendo il valore più vicino al fisiologico alla visita 4, e rientrando nel range fisiologico, come mostrato in **Figura 120**.

Per quanto riguarda invece il picco di dorsiflessione in appoggio, in corrispondenza della visita 0 questo risultava più alto del fisiologico per i pazienti M01 ed M05 e più basso per il paziente M04. Quanto si vede dalle **Figure 123 e 124** è che per M01 ed M05 questo subisce un abbassamento, raggiungendo il valore più vicino al fisiologico rispettivamente in corrispondenza della visita 1 per M01 e della visita 4 per M05, mentre si alza per il paziente M04, raggiungendo il valore più vicino al fisiologico alla visita 3. Per tutti e tre i pazienti i valori del picco registrati in corrispondenza delle visite appena citate rientrano nel range fisiologico, come si vede dalle **Figure 117, 120 e 121**.

Un'ulteriore differenza riguardante sempre la caviglia patologica e mostrata dai pazienti M01, M03, M04 ed M05 alla visita 0 era la maggiore altezza del picco di plantiflessione in fase di pendolamento, che facendo nuovamente riferimento alle **Figure 123 e 124** si vede come si sia abbassato per tutti ad eccezione di M04 (per il quale si è invece alzato ulteriormente allontanandosi ancora di più dal fisiologico), raggiungendo il valore più vicino al fisiologico alla visita 2 per M01 ed M05 e alla visita 1 per M03 (ma non rientrando per nessuno all'interno del range fisiologico).

Infine, il picco di dorsiflessione in pendolamento, che alla visita 0 risultava assente per i pazienti M02, M04, M05 ed F01, e più alto rispetto al range fisiologico per i pazienti M01 ed F03, dalle **Figure 123 e 124** si vede come per questi ultimi due sia soggetto ad un abbassamento, con il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 2 per M01 e della visita 1 per M03 (ma non rientrando mai nel range fisiologico), mentre alle visite 1 e 2, per il solo M05 la curva anziché rimanere piatta subisce una lieve risalita a partire dal picco di plantiflessione in pendolamento che dà origine al picco di dorsiflessione in pendolamento (**Figura 121**).

Per quanto riguarda la caviglia sana, alla visita 0 si era visto come per i pazienti M02, M03 ed M05, il picco di plantiflessione in appoggio risultasse più alto rispetto al fisiologico: guardando le **Figure 123 e 124** questo risulta abbassarsi per M02 ed M05, raggiungendo il valore più vicino al fisiologico rispettivamente alla visita 2 e alla visita 4

(ma rientrando nel range fisiologico solo per M05, come si vede dalla **Figura 121**), mentre per M03 risulta alzarsi ulteriormente.

Per tutti i pazienti ad eccezione di M04, il picco di dorsiflessione in appoggio risultava più alto rispetto al fisiologico, e si vede dalle **Figure 123 e 124** come questo si sia abbassato raggiungendo il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 1 per M01, della visita 2 per M02 ed M05 e della visita 3 per F01 (ma non rientrando per nessuno nel range fisiologico). Per M03 invece ha subito un ulteriore innalzamento e allontanamento dal fisiologico. Per il paziente M04 invece, il quale alla visita 0 mostrava un picco di dorsiflessione in appoggio interno al range fisiologico, si ha un allontanamento da quest'ultimo, con distanza maggiore da esso in corrispondenza della visita 3.

Durante la fase di pendolamento invece, alla visita 0 si è visto come tutti i pazienti mostrassero un picco di plantiflessione più alto rispetto al fisiologico, e dalle **Figure 123 e 124** si vede come questo si sia abbassato per tutti tranne che per M04, raggiungendo il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 1 per M01 ed F01, della visita 2 per M02 e M03 e della visita 3 per M05 (solo per quest'ultimo il valore rientra nel range fisiologico, come si vede dalla **Figura 121**). Per M04 invece risulta alzarsi ulteriormente, raggiungendo la massima distanza dal fisiologico alla visita 4.

Infine, per quanto riguarda il picco di dorsiflessione in pendolamento, il quale alla visita 0 risultava più alto del range fisiologico per i pazienti M01, M02, M05 ed F01, dalle **Figure 123 e 124** si vede come questo si sia abbassato, raggiungendo il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 3 per M01, della visita 1 per F01, della visita 2 per M02 e della visita 4 per M05 (solo per quest'ultimo il valore rientra nel range fisiologico, come si vede dalla **Figura 121**).

Come per la cinematica di anca e ginocchio, anche per la caviglia si ha variazione delle altezze relative tra i punti significativi. Si riportano nelle **Figure 125 e 126** sotto forma di istogrammi, le escursioni tra i picchi significativi della cinematica della caviglia misurate ad ogni visita, unitamente al ROM articolare.

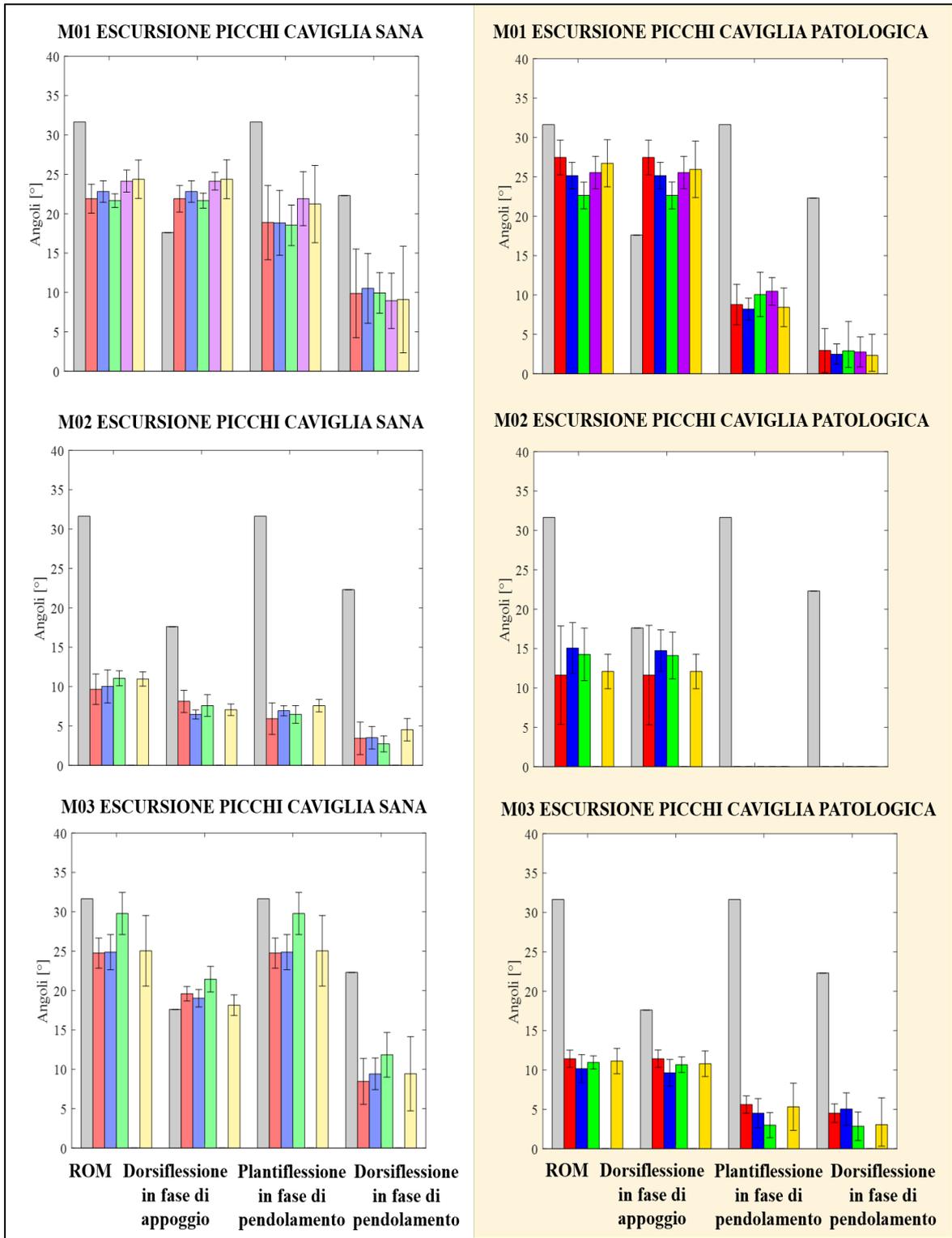


Figura 125. Misura di ROM articolare, dorsiflessione in fase di appoggio e plantiflessione e dorsiflessione in fase di pendolamento alle varie visite, per caviglia sana e caviglia patologica di M01, M02 ed M03. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia rappresenta il valore fisiologico

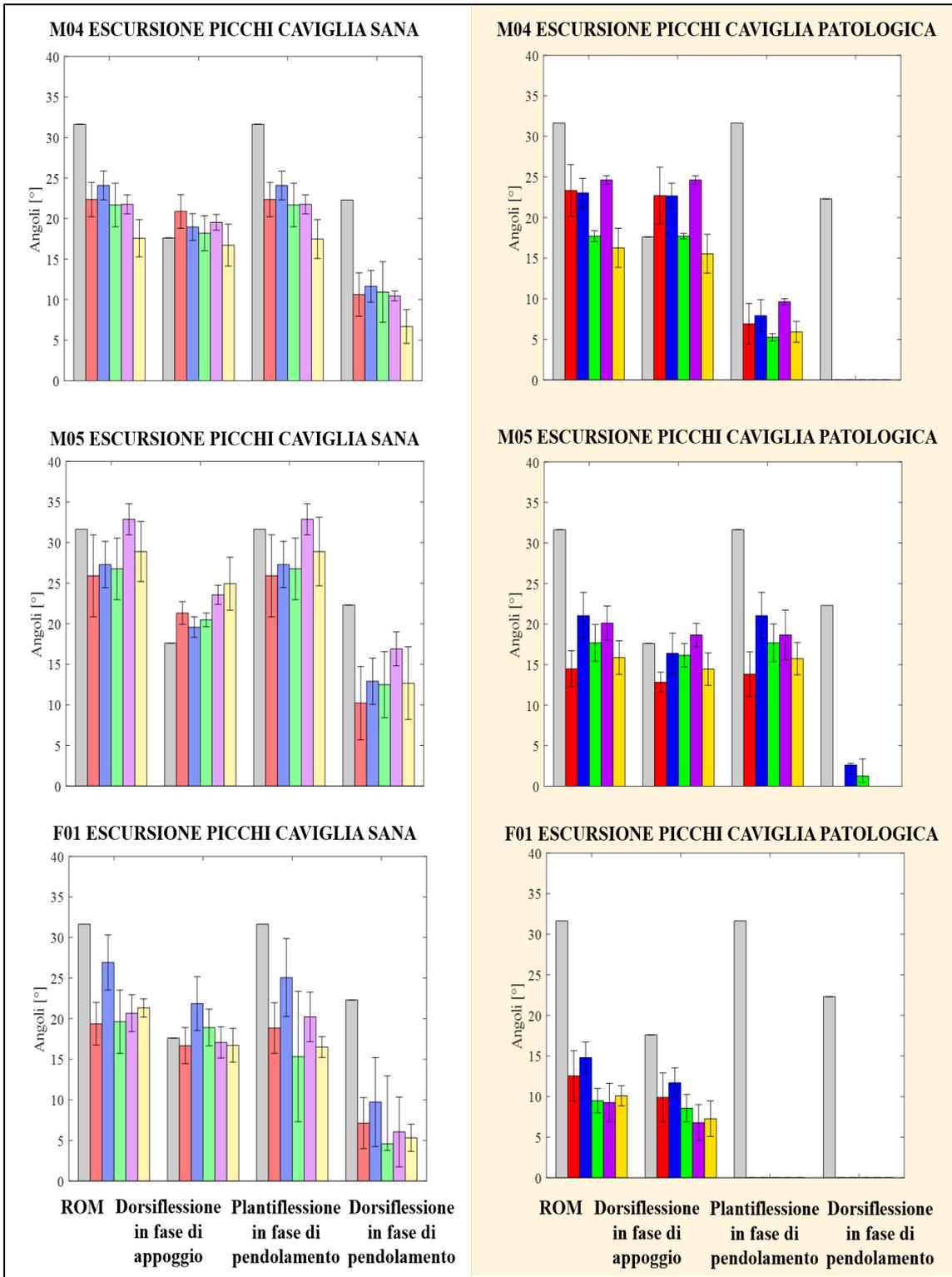


Figura 126. Misura di ROM articolare, dorsiflessione in fase di appoggio e plantiflessione e dorsiflessione in fase di pendolamento alle varie visite, per caviglia sana e caviglia patologica di M04, M05 ed F01. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia rappresenta il valore fisiologico.

La prima differenza notata alla visita 0 per la caviglia patologica rispetto al fisiologico riguardava la misura della dorsiflessione in fase di appoggio, la quale risultava superiore al valore fisiologico per i pazienti M01 ed M04 ed inferiore per tutti gli altri. Dalle **Figure 125 e 126** si vede come questa sia aumentata raggiungendo il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 1 per M02 ed F01 e della visita 3 per M05, mentre ha subito una diminuzione, e quindi un allontanamento dal fisiologico per il paziente M03. Per M01 ed M04, il valore della dorsiflessione è diminuito, raggiungendo la massima vicinanza con il fisiologico alla visita 2. Si nota anche come per M04 in corrispondenza della visita 3 si abbia un innalzamento del valore di estensione che lo allontana dal fisiologico ancora di più rispetto alla visita 0.

Per quanto riguarda invece la plantiflessione in pendolamento, la quale alla visita 0 risultava minore rispetto al fisiologico per i pazienti M01, M03, M04, ed M05, si vede dalle **Figure 125 e 126** come questa sia aumentata, raggiungendo il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 1 per M05 e della visita 3 per M01 ed M04. Per M03 invece c'è stata un'ulteriore diminuzione, con allontanamento massimo dal fisiologico in corrispondenza della visita 2.

Un'ulteriore differenza rispetto al fisiologico riguardava la misura della dorsiflessione in pendolamento che risultava minore per i pazienti M01 ed M03 e, facendo riferimento alle **Figure 125 e 126**, si vede come questa sia rimasta all'incirca costante per M01 e sia invece aumentata per M03, raggiungendo il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 1, per poi diminuire nuovamente ad un valore più lontano dal fisiologico di quello registrato alla visita 0.

Per la caviglia sana invece, la prima differenza con il fisiologico alla visita 0 era la dorsiflessione in fase di appoggio che risultava minore del fisiologico per i pazienti M02 ed F01 e maggiore per tutti gli altri. Dalle **Figure 125 e 126** si vede come per M01 ed M05 ci sia stato un ulteriore aumento (quindi un allontanamento dal valore fisiologico), per M04 una diminuzione (con avvicinamento massimo al valore fisiologico in corrispondenza della visita 2) e per M02 una diminuzione (con conseguente allontanamento dal fisiologico). Per i pazienti F01 ed M03, si è visto invece un iniziale aumento che li ha allontanati dal fisiologico, seguito poi da una diminuzione che li ha portati al raggiungimento del valore più vicino a quest'ultimo in corrispondenza della visita 3 per F01 e della visita 4 per M03.

La seconda differenza con il fisiologico era una minore plantiflessione in fase di pendolamento per tutti i pazienti rispetto ai valori fisiologici, la quale, come si vede dalle **Figure 125 e 126**, subisce un aumento, raggiungendo il valore più vicino al fisiologico

in corrispondenza delle stesse visite citate per la dorsiflessione in pendolamento, ad eccezione di M01 per il quale si verifica in corrispondenza della visita 3.

Infine, sempre alla visita 0 si era notata una minore dorsiflessione in fase di pendolamento per tutti i pazienti, la quale come si vede dalle **Figure 125 e 126** aumenta, raggiungendo il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 1 per M01, M04 ed F01, della visita 4 per M02, della visita 2 per M03 e della visita 3 per M05.

Per quanto riguarda il ROM articolare della caviglia patologica, per i pazienti M01, M02 ed M03 questo corrisponde alla dorsiflessione in fase di appoggio e così anche la sua evoluzione, mentre nel caso di M04, M05 ed F01, i valori non corrispondono a quelli di nessun'altra escursione e quindi è necessario analizzarli a parte. Dalle **Figure 125 e 126** si può vedere come per tutti e tre vi sia un aumento del ROM, con avvicinamento massimo al valore fisiologico in corrispondenza della visita 3 per M04 e della visita 1 per M05 e F01.

Nel caso della caviglia sana invece, per i soli pazienti M02 ed F01 non vi è corrispondenza tra il ROM e una delle escursioni precedentemente citate, mentre per gli altri il suo andamento segue quello della dorsiflessione in fase di appoggio (M01) o della plantiflessione in fase di pendolamento (M03, M04, M05). Per entrambi i pazienti M02 ed F01, si è visto come alla visita 0 il ROM fosse minore rispetto al fisiologico, e dalle **Figure 125 e 126** si vede come questo aumenti raggiungendo il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 1 per F01 e della visita 2 per M02. Si riporta in **Figura 127** sotto forma di istogramma, l'andamento del ROM medio della caviglia patologica e della caviglia sana per ogni visita.

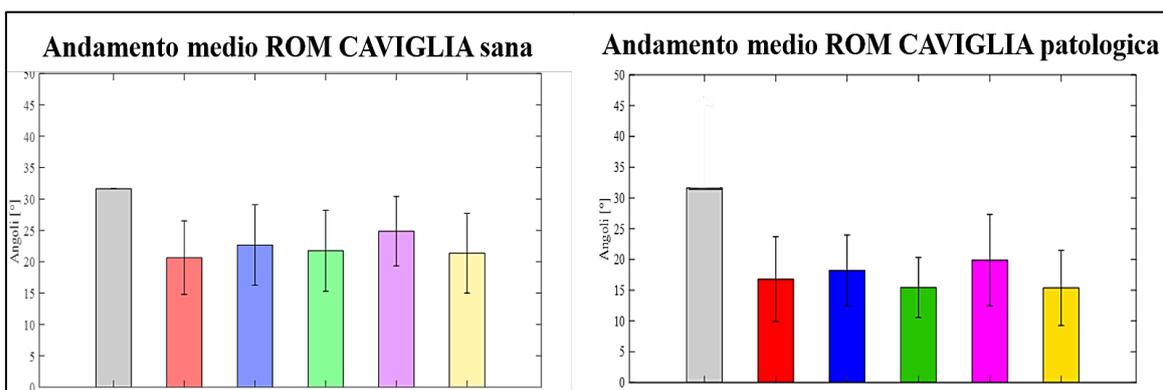


Figura 127. Andamento ROM medio calcolato ad ogni visita per caviglia sana e caviglia patologica. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia rappresenta il valore fisiologico.

I principali miglioramenti per la cinematica della caviglia patologica dovuti all'effetto della tossina botulinica sono stati:

- Un avvicinamento dell'altezza dei punti significativi delle curve ai rispettivi valori fisiologici, in particolare:
 - il picco di plantiflessione di fase di appoggio, con un avvicinamento massimo al valore fisiologico alla visita 1 per M03, alla visita 3 per M05 e alla visita 4 per M04.
 - il picco di dorsiflessione in fase di appoggio, con un avvicinamento massimo al valore fisiologico alla visita 1 per M01, alla visita 4 per M05 e alla visita 3 per M04.
 - il picco di plantiflessione in fase di pendolamento, con un avvicinamento massimo al valore fisiologico alla visita 1 per M03 e alla visita 2 per M01 ed M05.
 - il picco di dorsiflessione in fase di pendolamento, con un avvicinamento massimo al valore fisiologico alla visita 1 per M03 e alla visita 2 per M01. Inoltre, per M05, che mostrava una linea piatta in corrispondenza del picco, quest'ultimo si è manifestato alle visite 1 e 2.
- Un avvicinamento della misura della dorsiflessione in fase di appoggio al suo valore fisiologico, con un massimo alla visita 1 per M02 ed F01, alla visita 2 per M01 ed M04 e alla visita 3 per M05.
- Un avvicinamento della misura della plantiflessione in fase di pendolamento al suo valore fisiologico, con un massimo alla visita 1 per M05 e alla visita 3 per M01 ed M04.
- Un avvicinamento della misura della dorsiflessione in fase di pendolamento al suo valore fisiologico, con un massimo alla visita 1 per M03.
- Un avvicinamento della misura del ROM articolare al suo valore fisiologico, con un massimo alla visita 3 per M04 e alla visita 1 per M05 ed F01.

Per quanto riguarda la cinematica della caviglia sana si sono avuti invece:

- Un avvicinamento dell'altezza dei punti significativi delle curve ai rispettivi valori fisiologici, in particolare:
 - il picco di plantiflessione di fase di appoggio, con un avvicinamento massimo al valore fisiologico alla visita 2 per M02 e alla visita 4 per M05.
 - il picco di dorsiflessione in fase di appoggio, con un avvicinamento massimo al valore fisiologico alla visita 1 per M01, alla visita 2 per M02 ed M05 e alla visita 3 per F01.
 - il picco di plantiflessione in fase di pendolamento, con un avvicinamento massimo al valore fisiologico alla visita 1 per M01 ed F01, alla visita 2 per M02 ed M03 e alla visita 3 per M05.

- il picco di dorsiflessione in fase di pendolamento, con un avvicinamento massimo al valore fisiologico alla visita 3 per M01 ed F01, alla visita 2 per M02 e alla visita 4 per M05.
- Un avvicinamento della misura della dorsiflessione in fase di appoggio al suo valore fisiologico, con un massimo alla visita 4 per M03, della visita 3 per F01 e alla visita 2 per M04.
- Un avvicinamento della misura della plantiflessione in fase di pendolamento al suo valore fisiologico, con un massimo alla visita 1 per M01, M04 ed F01, alla visita 2 per M03, alla visita 3 per M05 e alla visita 4 per M02.
- Un avvicinamento della misura della dorsiflessione in fase di pendolamento al suo valore fisiologico, con un massimo alla visita 1 per M01, M04 ed F01, alla visita 2 per M03, alla visita 3 per M05 e alla visita 4 per M02.
- Un avvicinamento della misura del ROM articolare al suo valore fisiologico, con un massimo in corrispondenza della visita 2 per M02 e della visita 1 per F01.

6.4 Analisi della cinematica della caviglia nei piani frontale e trasversale post-iniezione di tossina botulinica

Si riportano nelle **Figure 128, 129, 130, 131, 132 e 133** la cinematica per caviglia sana e per caviglia patologica sul piano frontale dei sei pazienti. In tutte le figure ogni colore è indicativo di una visita, in particolare: in rosso la Visita 0 (pre iniezione), in blu la Visita 1 (30 giorni dall'iniezione), in verde la Visita 2 (60 giorni dall'iniezione), in viola la Visita 3 (90 giorni dall'iniezione) ed in giallo la Visita 4 (120 giorni dall'iniezione). In grigio si riportano i valori fisiologici. In questo caso si è monitorato solamente il ROM articolare, quindi si riporta l'evoluzione di quest'ultimo sotto forma di istogramma nelle **Figure 134 e 135**. Come detto in precedenza, non essendo a conoscenza della curva fisiologica e quindi del valore fisiologico del ROM non è possibile dire se questo si evolva verso valori migliori o peggiori rispetto alla Visita 0, inoltre non è possibile fare un confronto tra le curve patologiche e le curve dell'arto sano, in quanto anche queste ultime hanno subito dei cambiamenti durante il periodo di indagine.

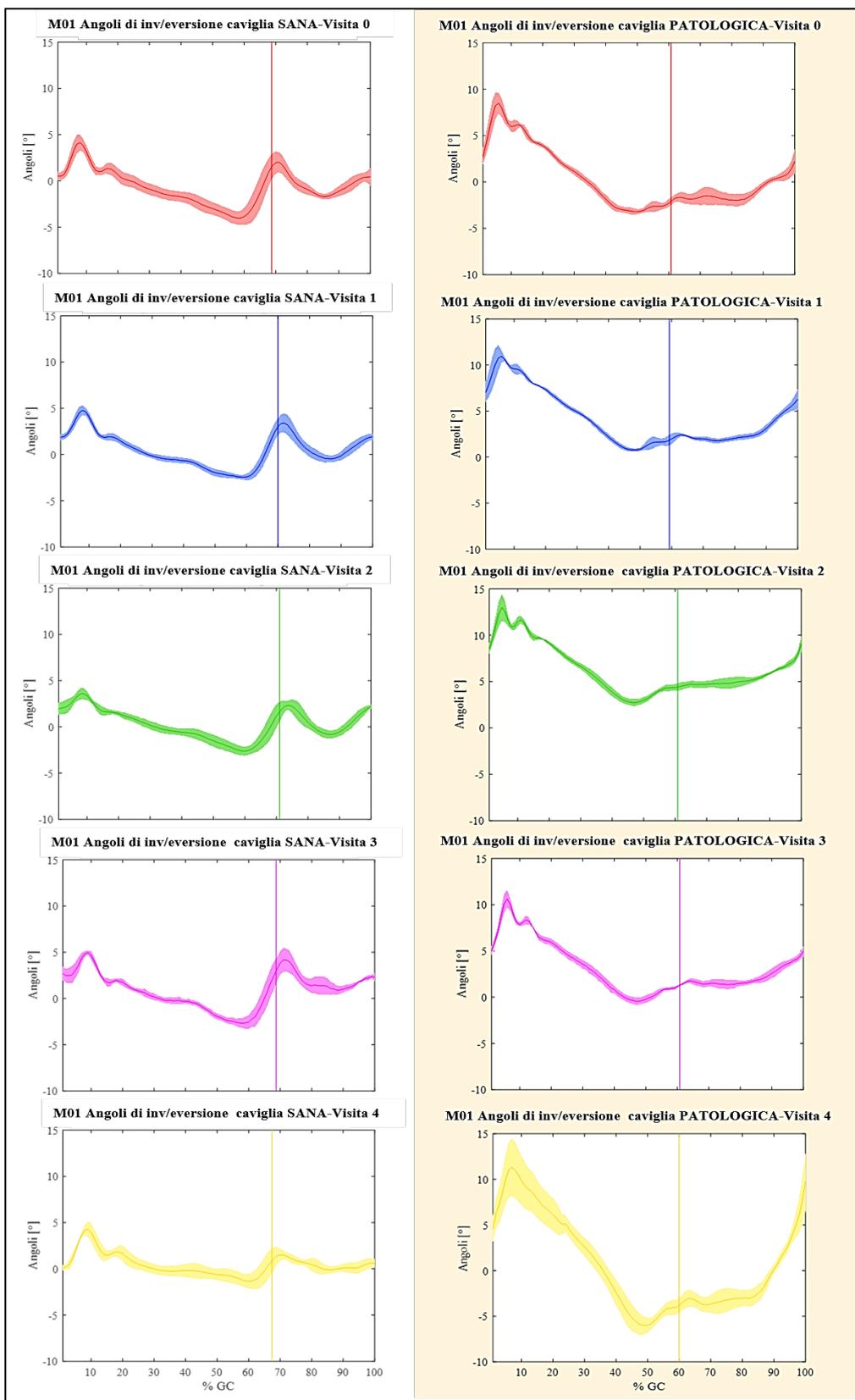


Figura 128. Angoli di inv/eversione di caviglia per entrambi gli arti di M01, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

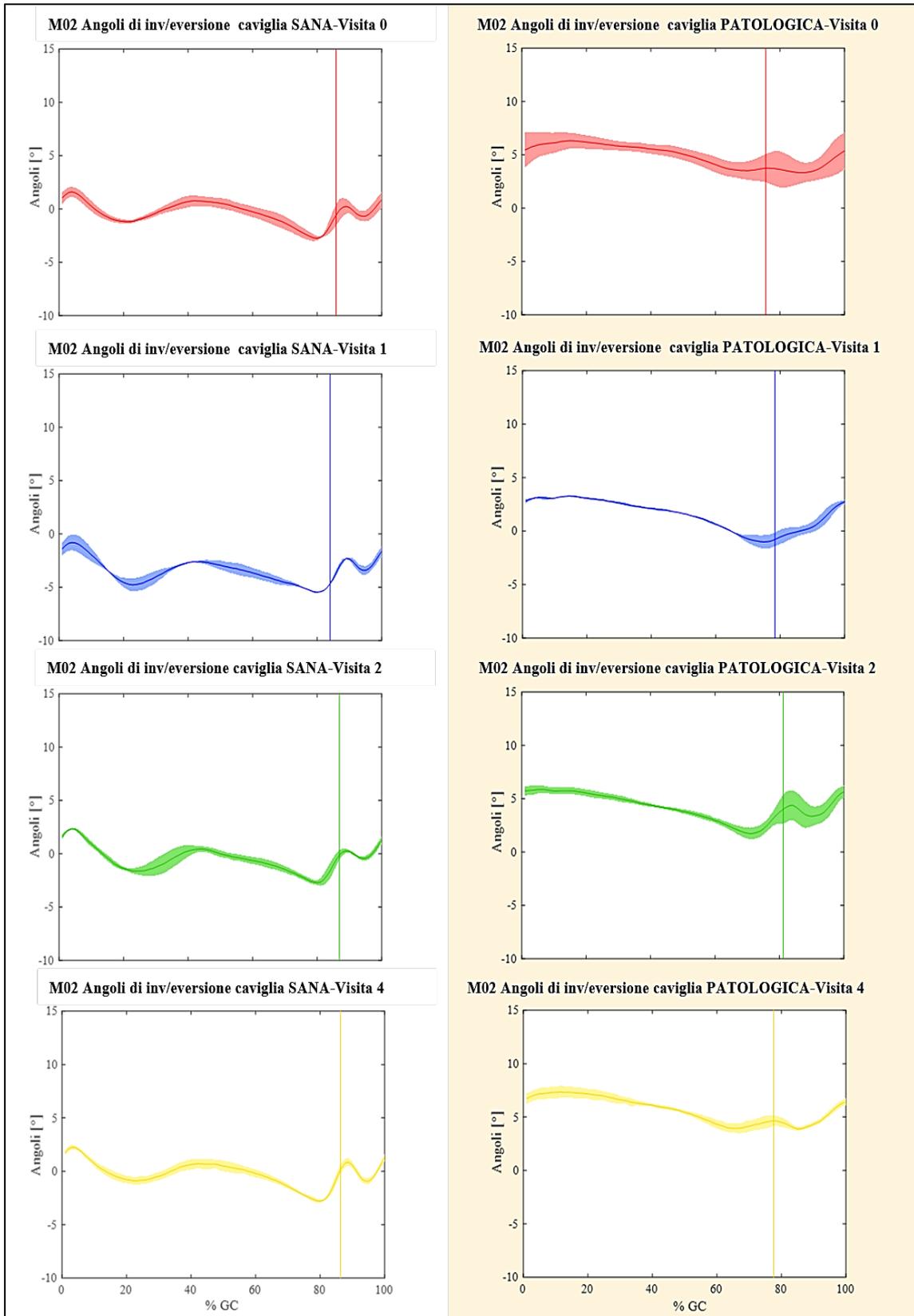


Figura 129. Angoli di inv/everzione di caviglia per entrambi gli arti di M02, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

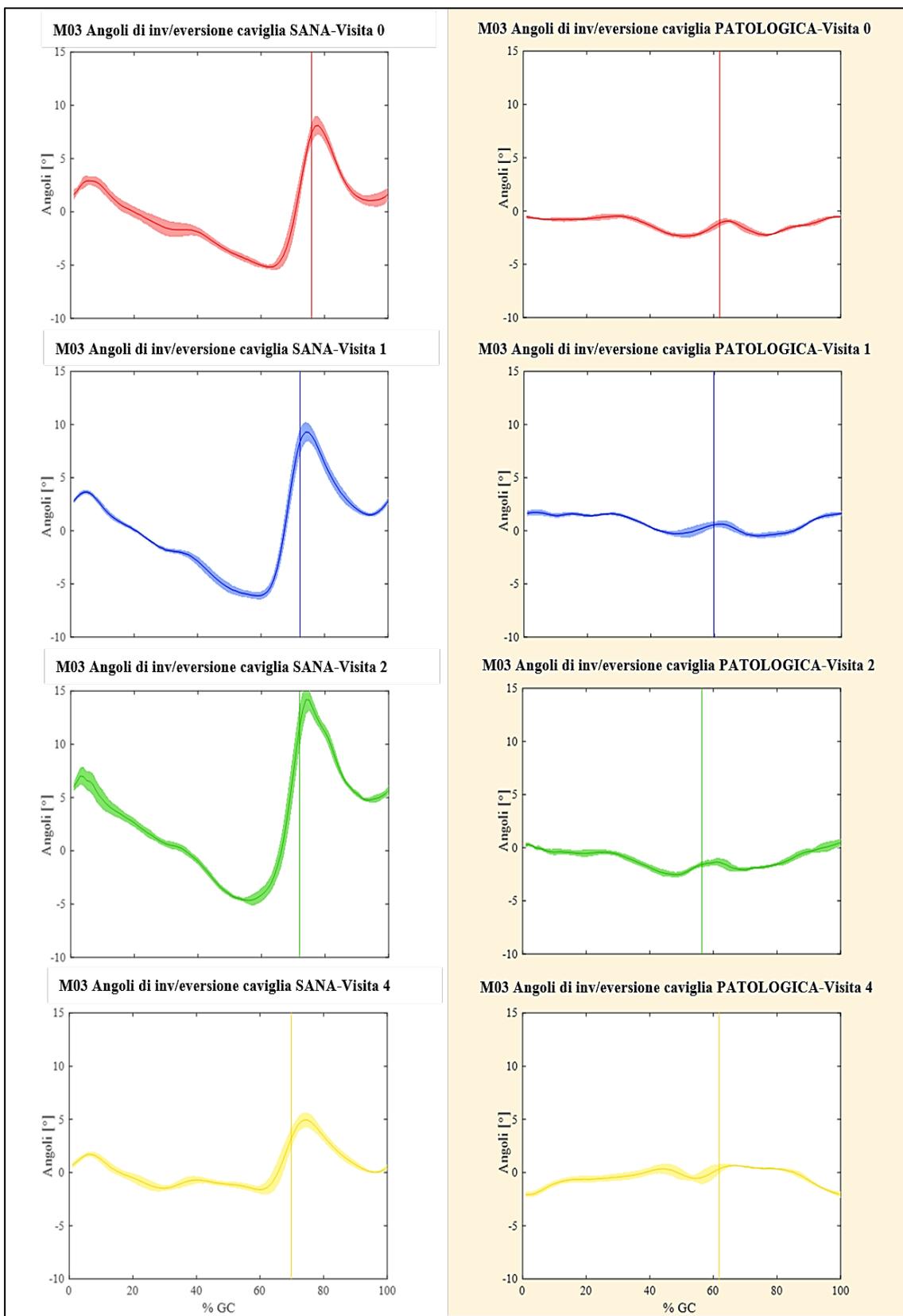


Figura 130. Angoli di inv/eversione di caviglia per entrambi gli arti di M03, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

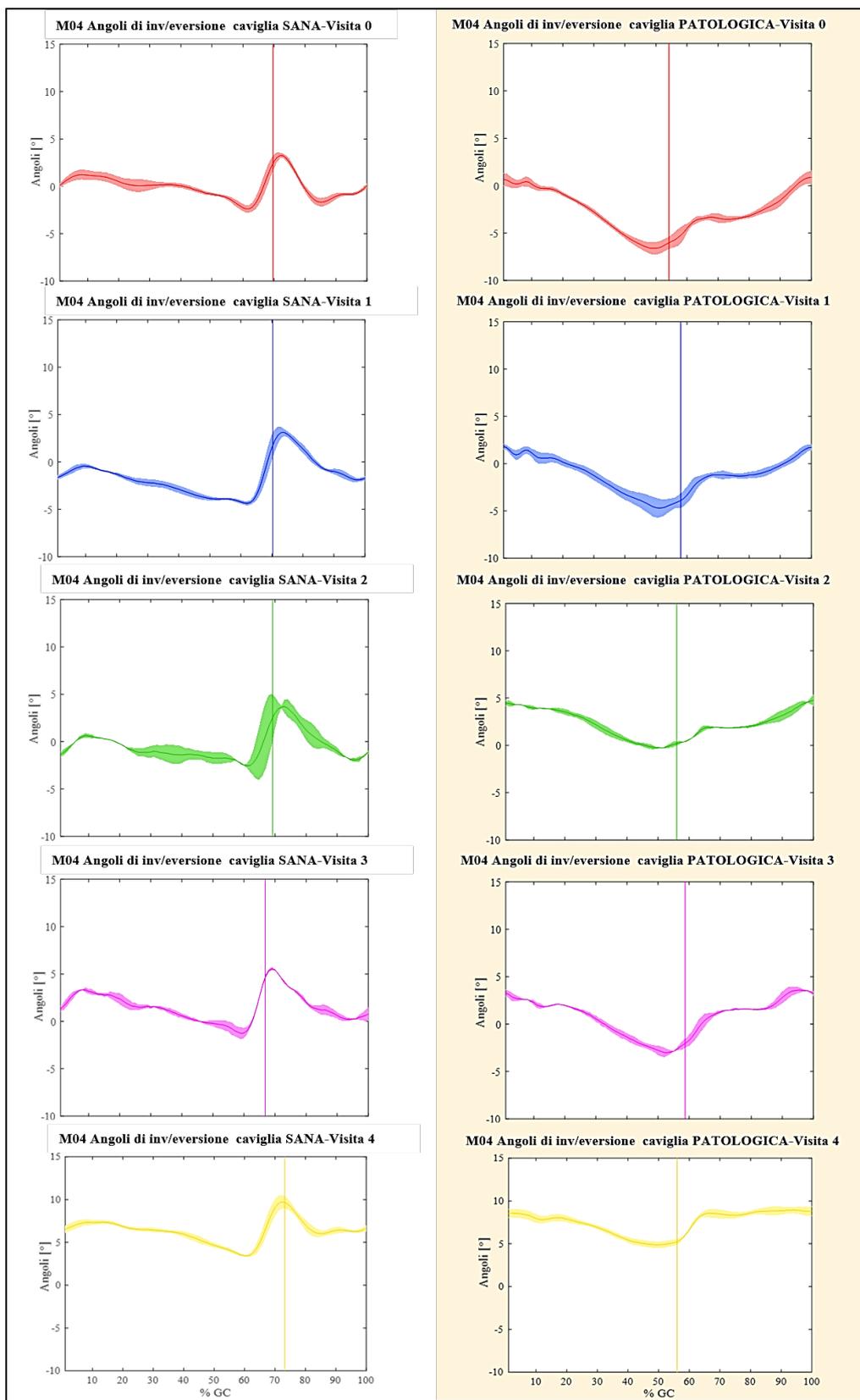


Figura 131. Angoli di inv/everzione di caviglia per entrambi gli arti di M04, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

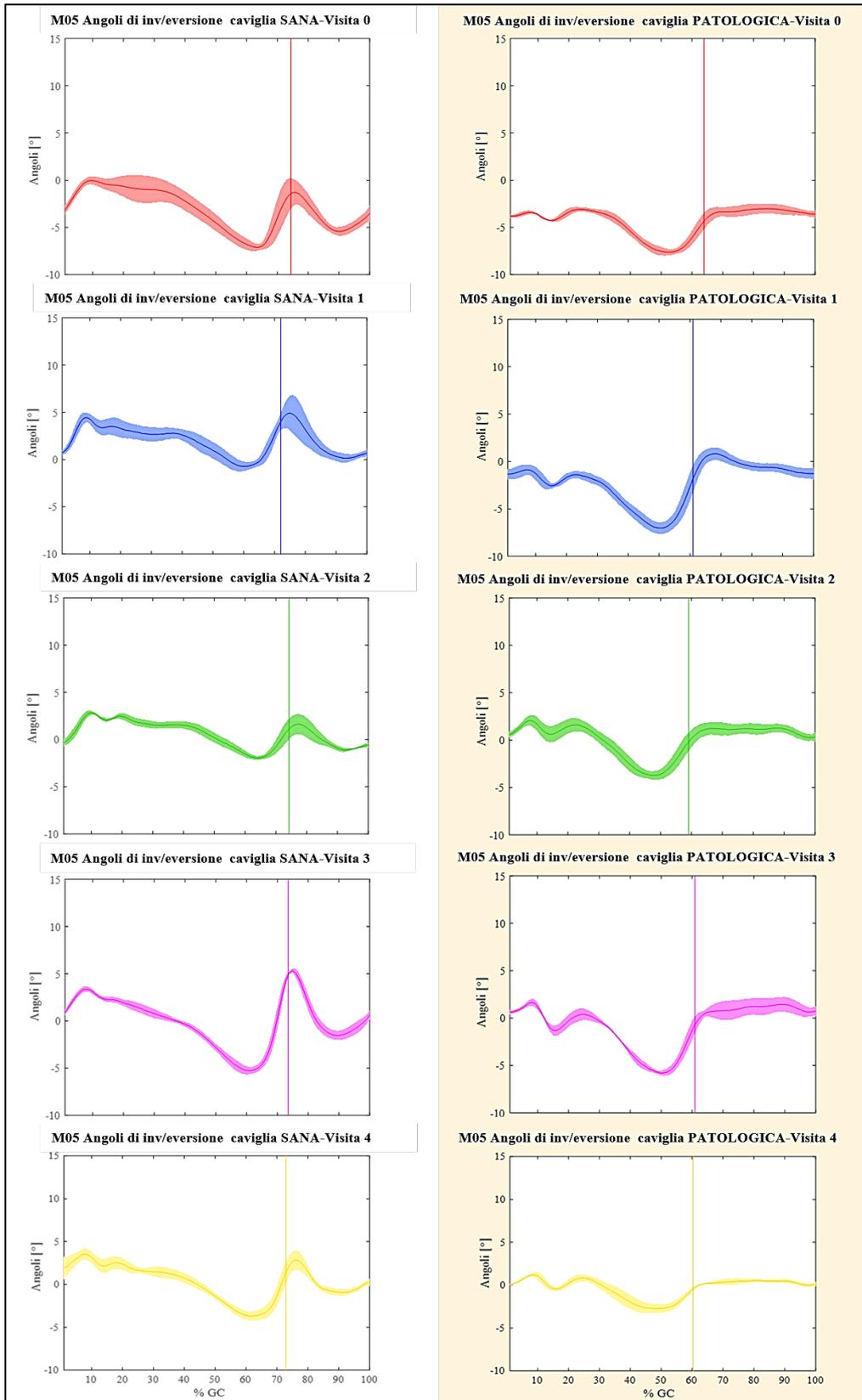


Figura 132. Angoli di inv/eversione di caviglia per entrambi gli arti di M05, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

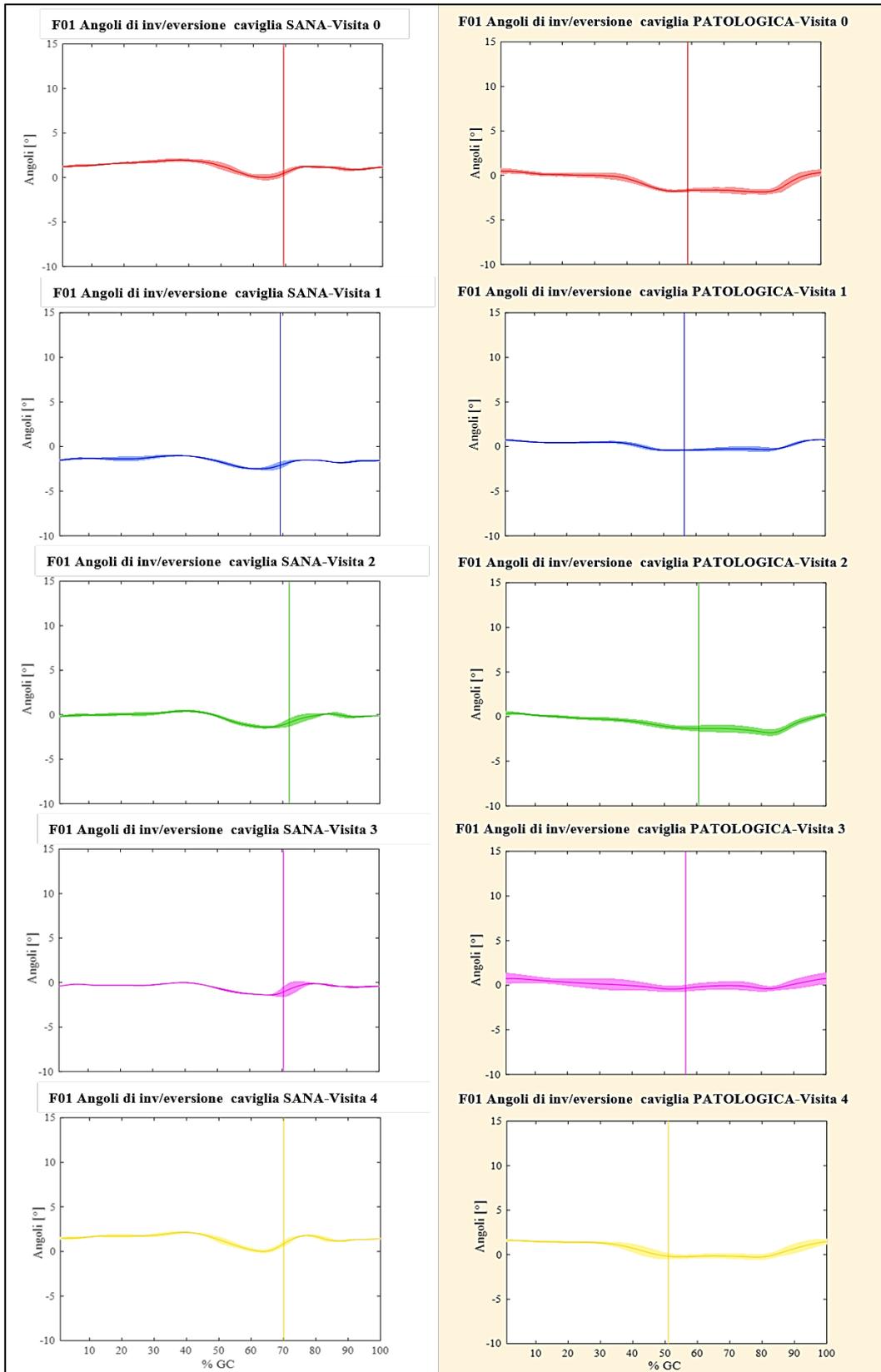


Figura 133. Angoli di inv/eversione di caviglia per entrambi gli arti di F01, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

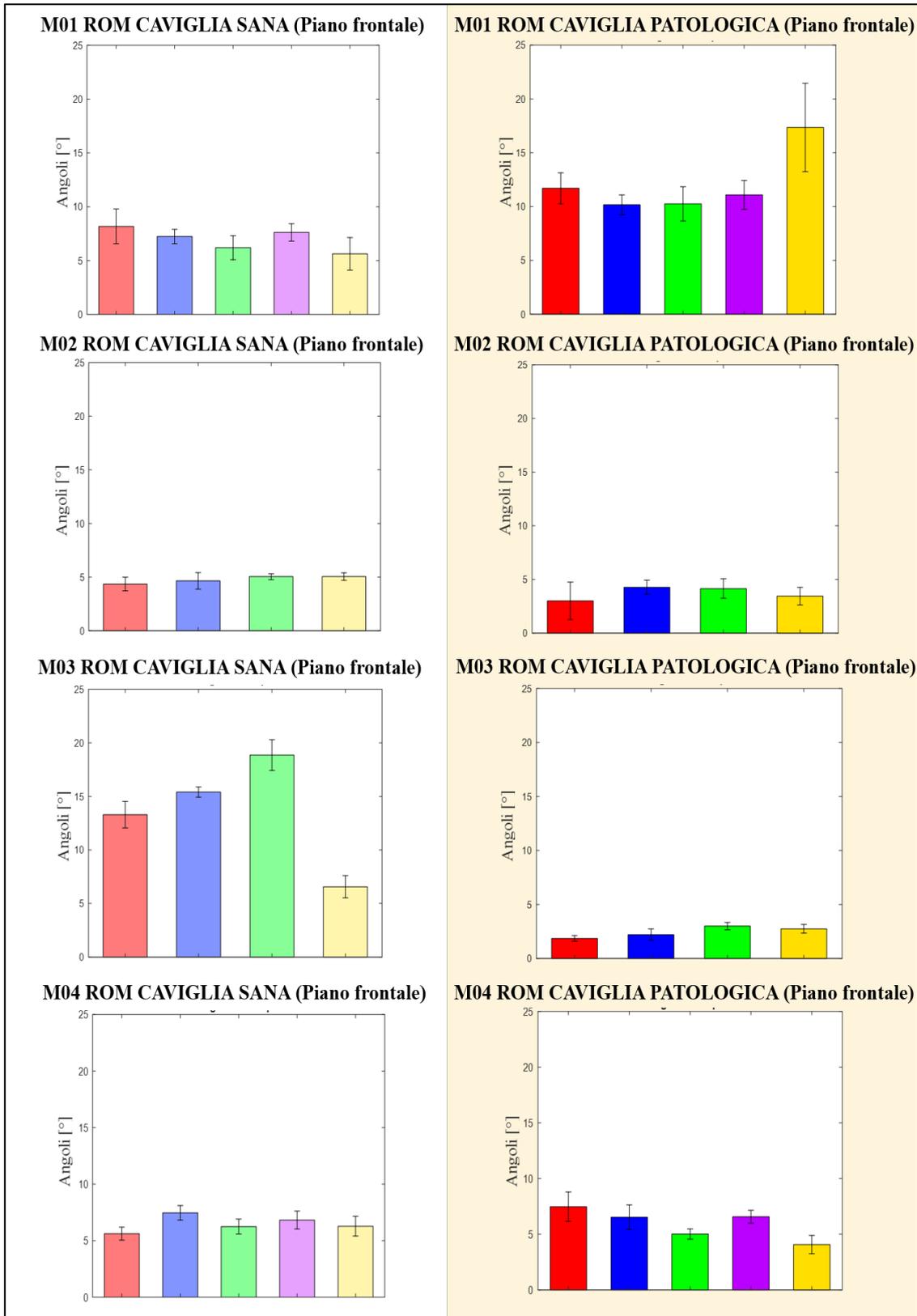


Figura 134. Misura del ROM articolare sul piano frontale alle varie visite, per caviglia sana e caviglia patologica di M01, M02, M03 ed M04. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4.

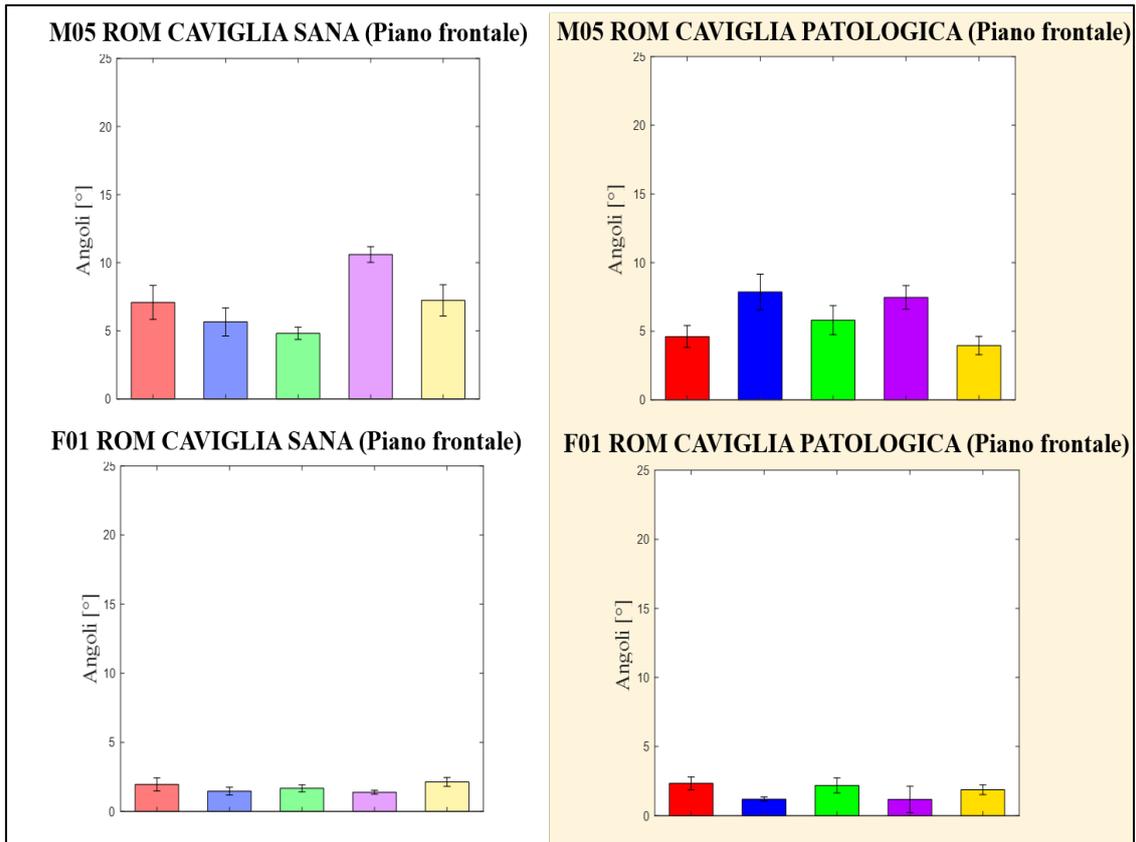


Figura 135. Misura del ROM articolare sul piano frontale alle varie visite, per caviglia sana e caviglia patologica di M05 ed F01. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4.

Come per il piano frontale, si riportano nelle **Figure 136, 137, 138, 139, 140 e 141** la cinematica della caviglia sana e della caviglia patologica sul piano trasversale di tutti e sei pazienti. In questo caso avendo la curva fisiologica è possibile fare un confronto tra il ROM articolare misurato alle varie visite e il ROM fisiologico. Si riportano quindi per ogni paziente sottoforma di istogramma, i valori dei ROM dell'arto sano e dell'arto patologico ad ogni visita unitamente al valore fisiologico, nelle **Figure 142 e 143**.

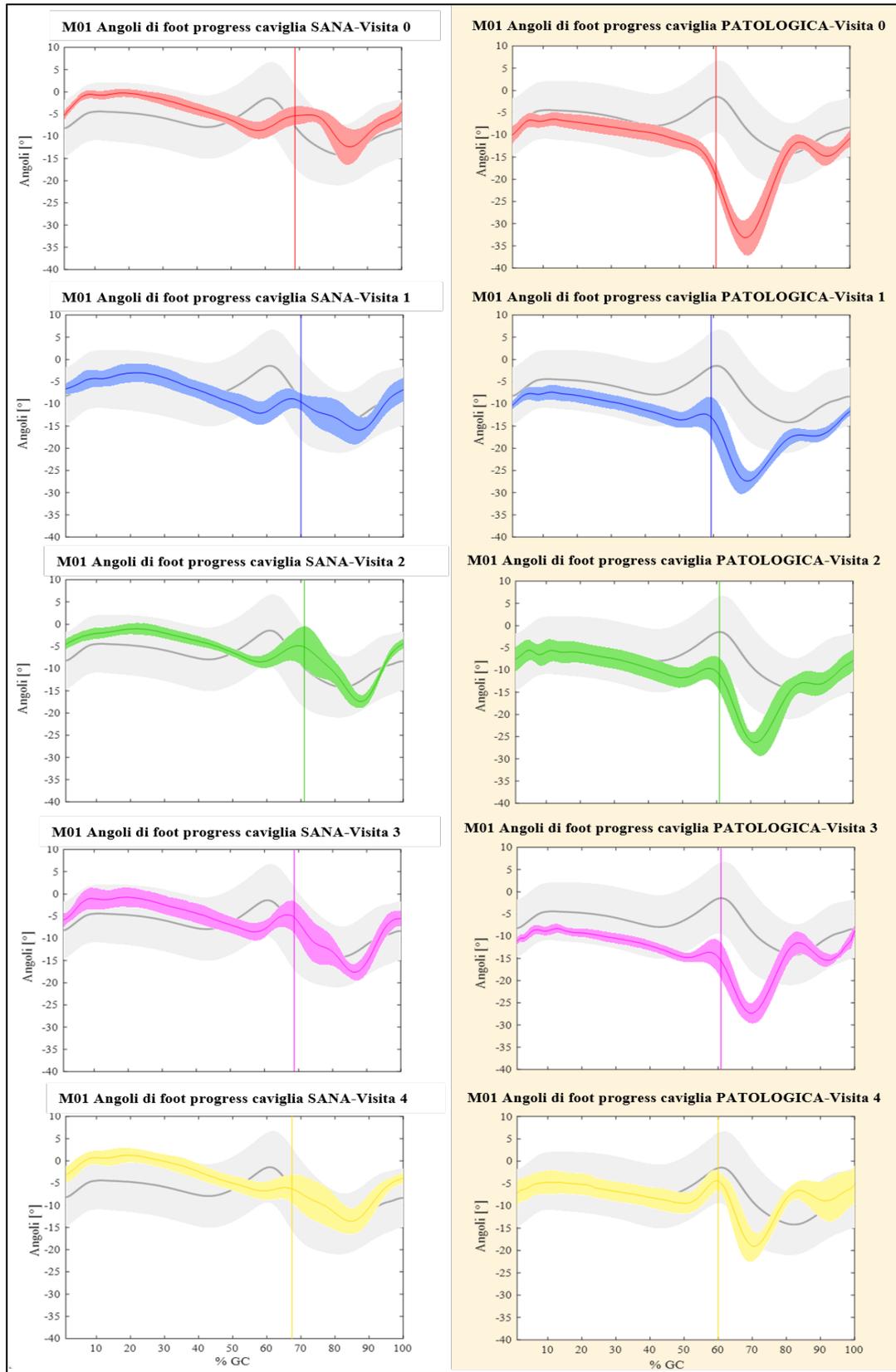


Figura 136. Angoli di foot progress per entrambi gli arti di M01, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

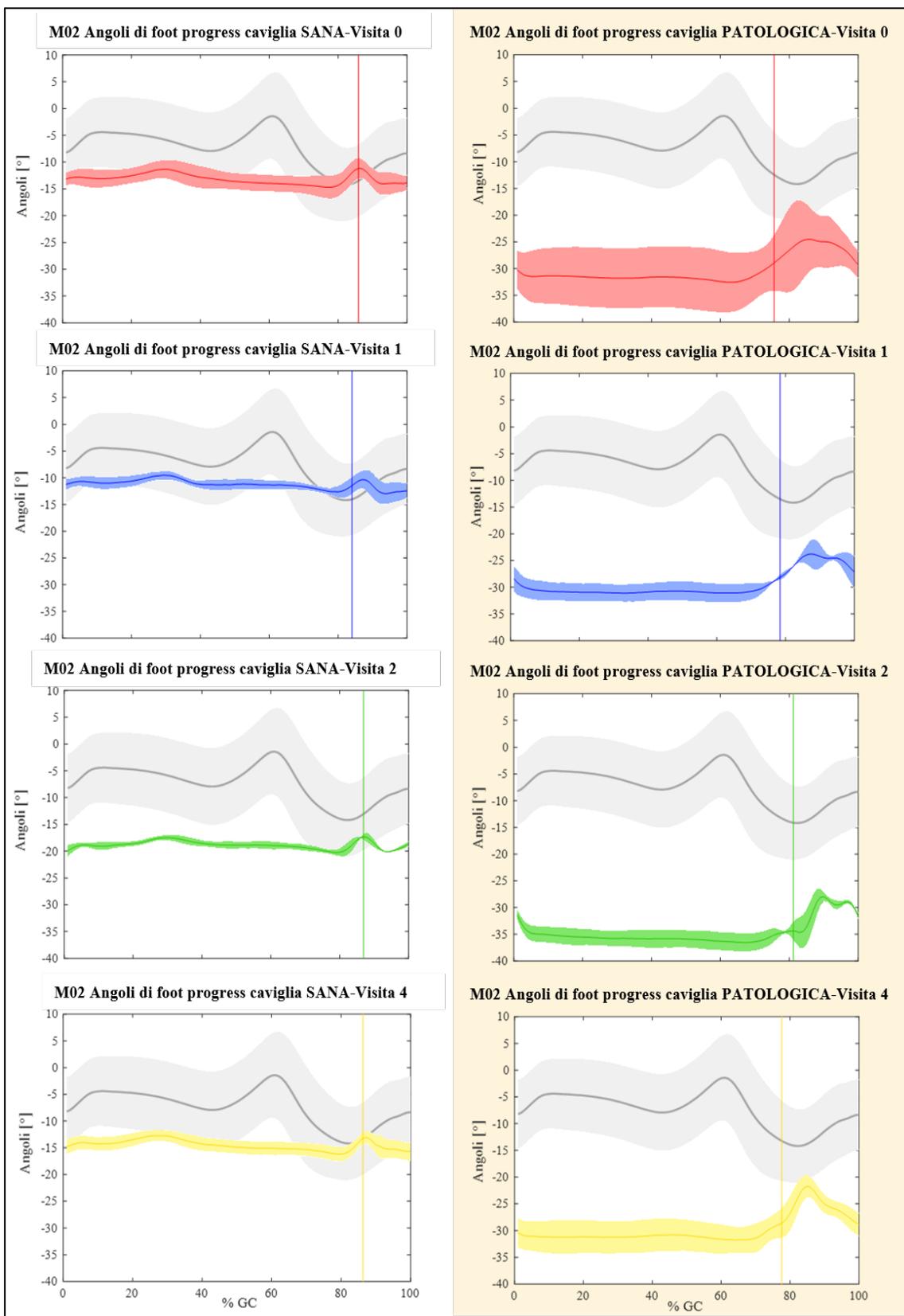


Figura 137. Angoli di foot progress per entrambi gli arti di M02, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

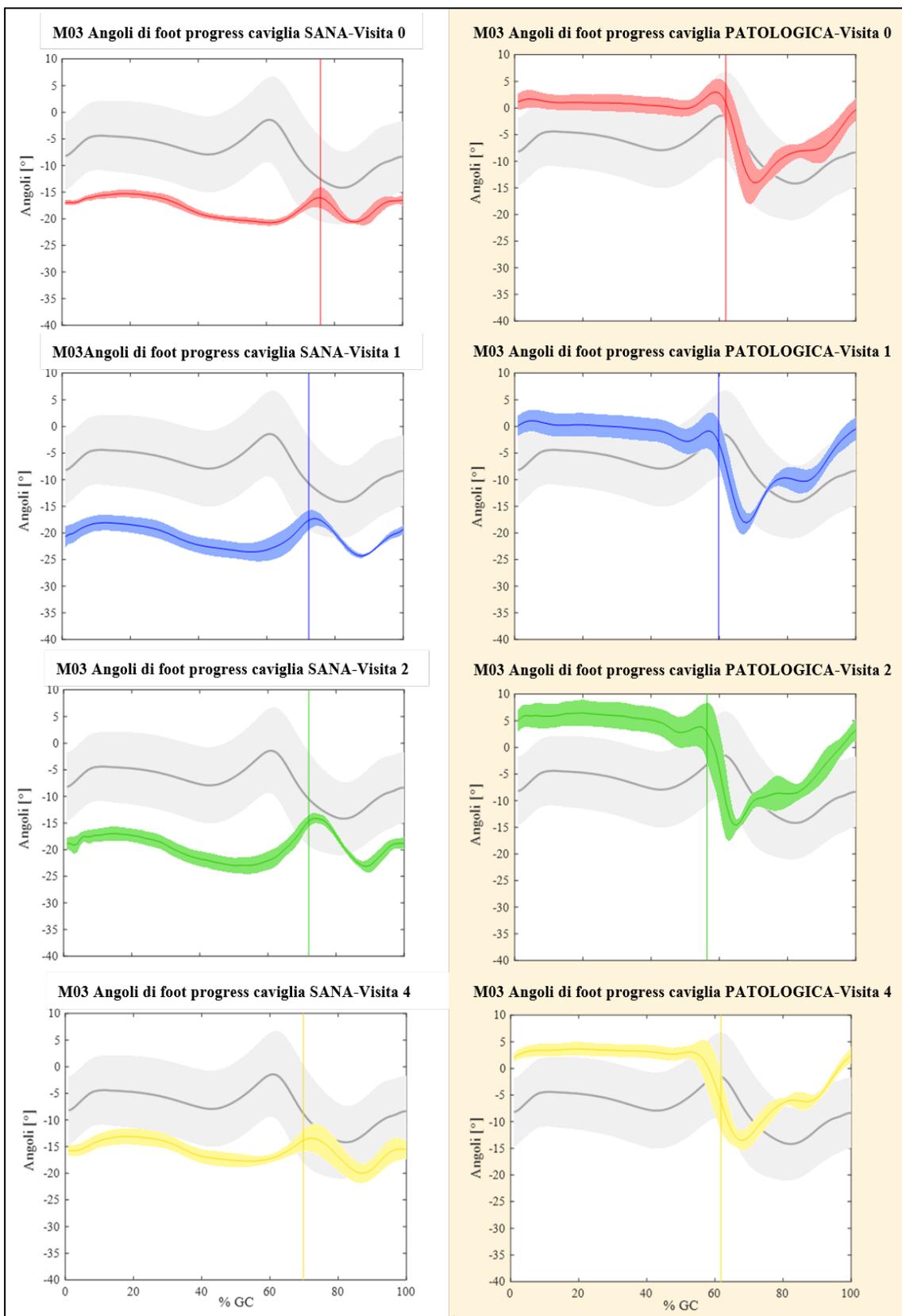


Figura 138. Angoli di foot progress per entrambi gli arti di M03, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

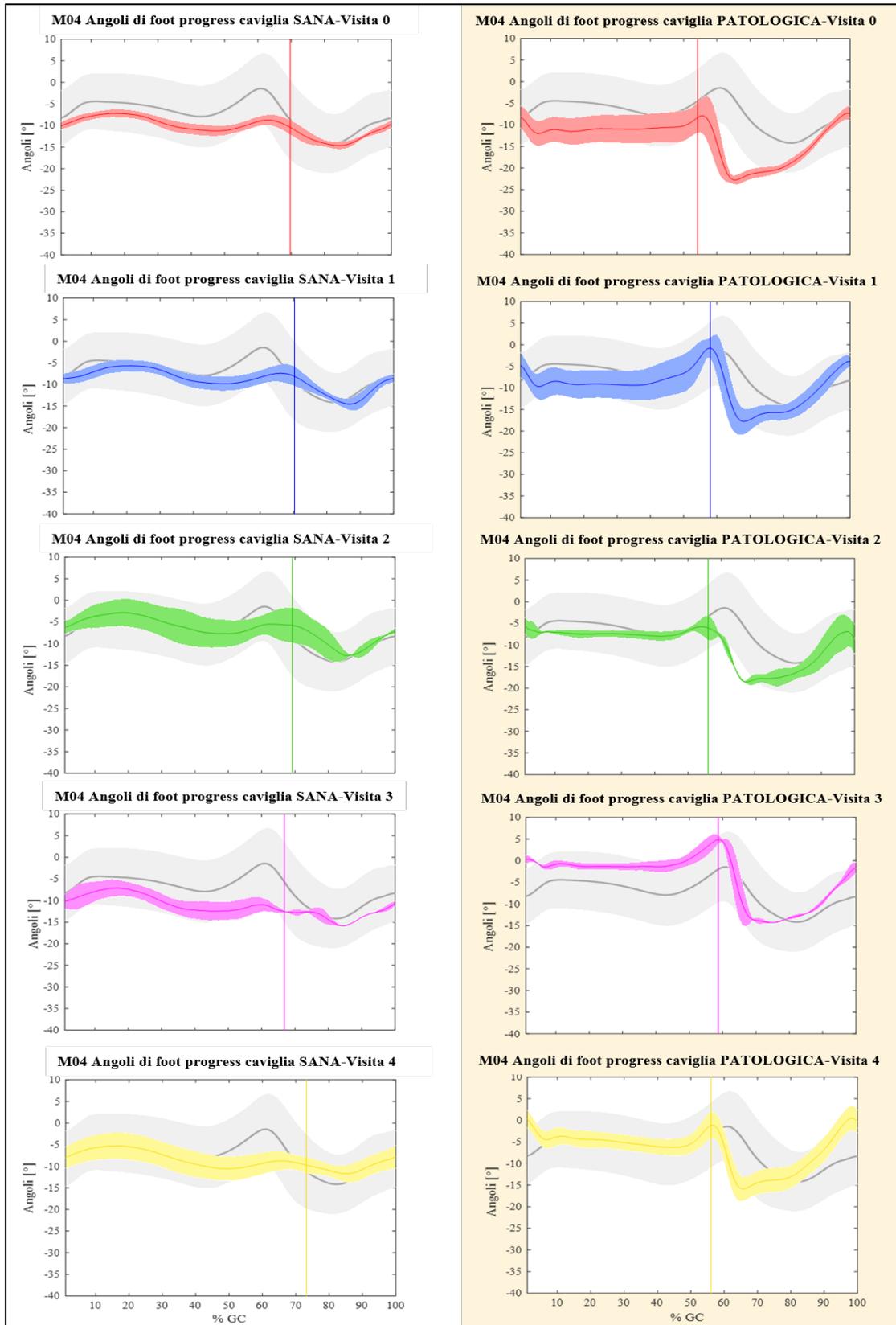


Figura 139. Angoli di foot progress per entrambi gli arti di M04, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

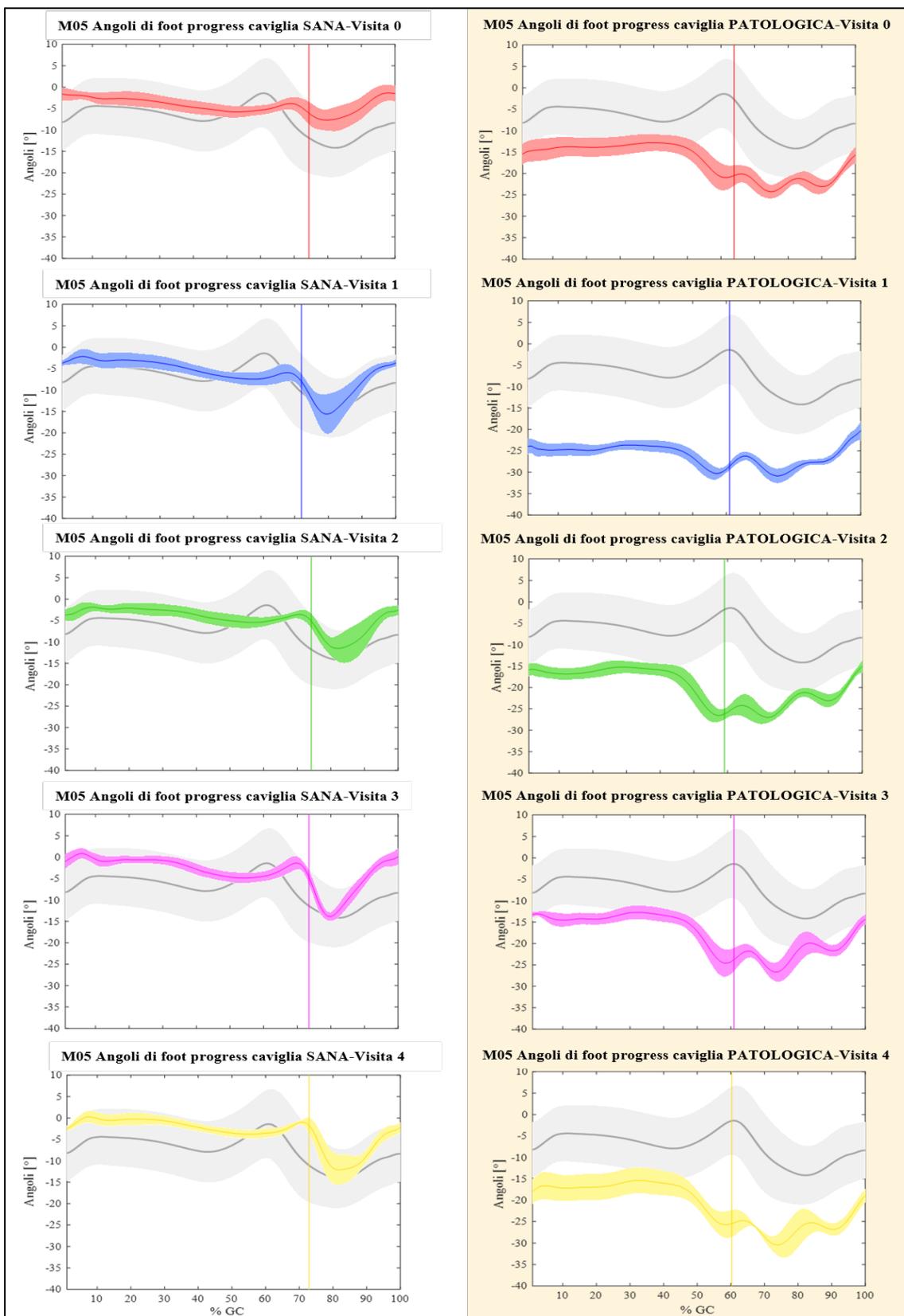


Figura 140. Angoli di foot progress per entrambi gli arti di M05, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

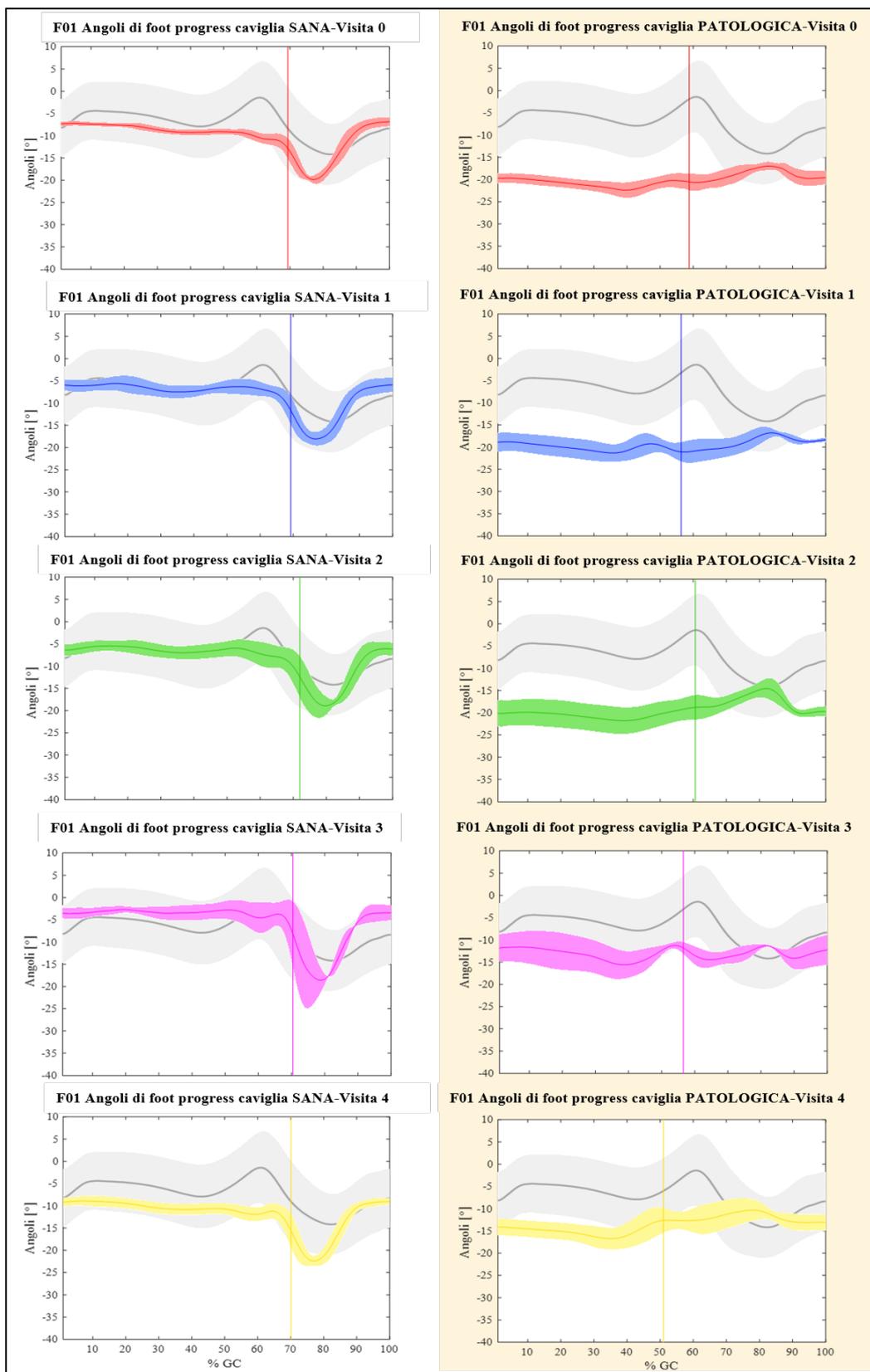


Figura 141. Angoli di foot progress per entrambi gli arti di F01, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

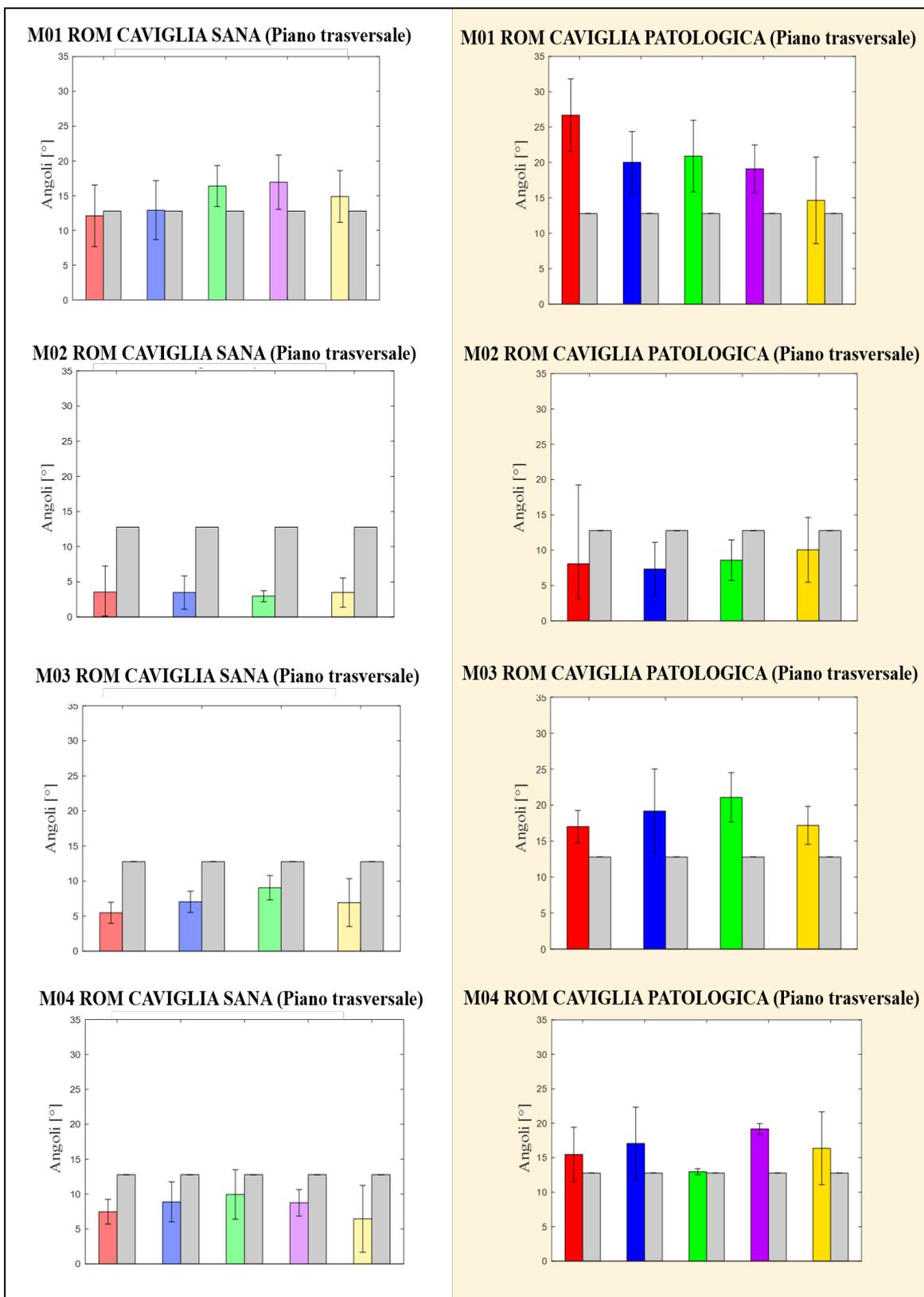


Figura 142. Misura del ROM articolare sul piano trasversale alle varie visite, per caviglia sana e caviglia patologica di M01, M02, M03 ed M04. Ogni visita corrisponde ad un colore rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4.

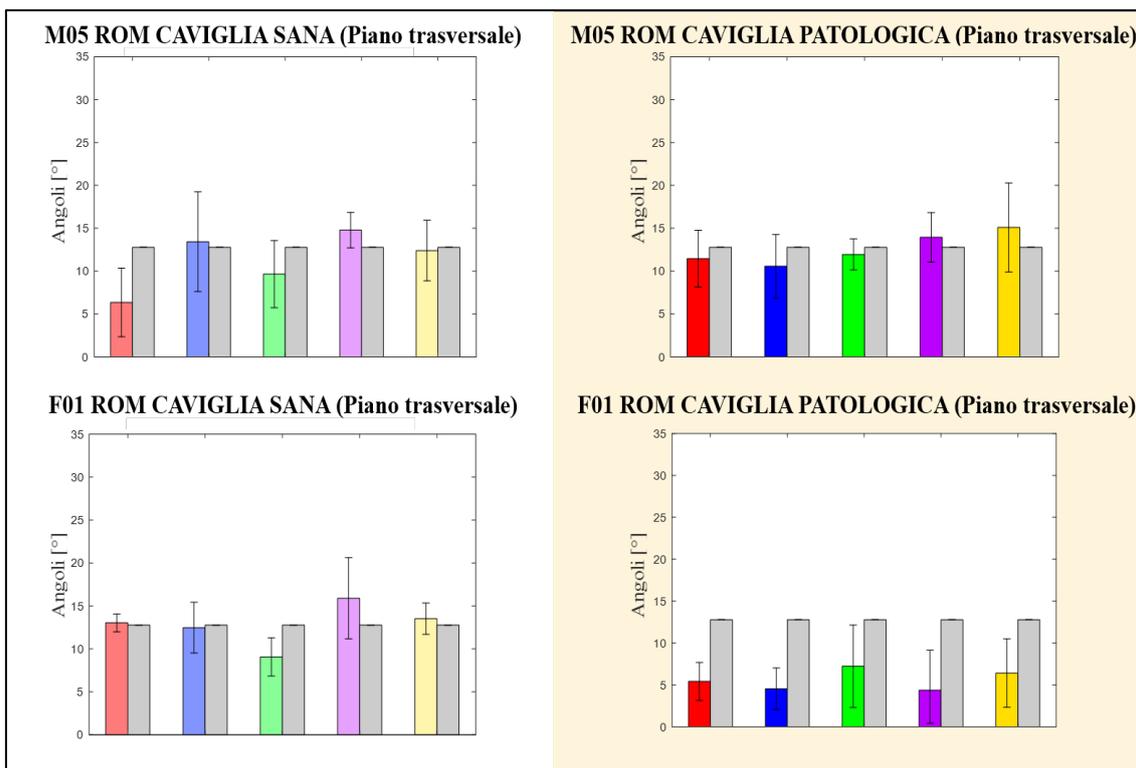


Figura 143. Misura del ROM articolare sul piano trasversale alle varie visite, per caviglia sana e caviglia patologica di M05 ed F01. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4.

Nel caso della caviglia patologica, quanto visto alla visita 0 era che per i pazienti M01, M03 ed M04 il ROM risultava maggiore del valore fisiologico mentre per gli altri risultava minore. Dalle **Figure 142 e 143** si vede come per M01 ed M04 si abbia una diminuzione, con il raggiungimento del valore più prossimo al fisiologico in corrispondenza della visita 4 per M01 e della visita 2 per M04, mentre per M03 si ha un ulteriore aumento, con conseguente allontanamento dal valore fisiologico. È necessario anche sottolineare come per M04, al miglioramento in corrispondenza della visita 2, segua un nuovo aumento del valore del ROM che, in corrispondenza della visita 3 raggiunge un valore più lontano dal fisiologico rispetto alla visita 0. Per quanto riguarda i restanti pazienti, si ha un aumento del ROM, con avvicinamento massimo al valore fisiologico in corrispondenza della visita 4 per M02 e della visita 2 per M05 e F01.

Per quanto riguarda la caviglia sana invece, in corrispondenza della visita 0 i pazienti M01 ed F01 presentavano dei ROM molto simili al fisiologico, mentre per tutti gli altri pazienti si avevano valori minori. Sempre facendo riferimento alle **Figure 142 e 143**, si vede come questo sia aumentato, raggiungendo il valore più vicino al fisiologico in corrispondenza della visita 2 per M03 ed M04 e della visita 1 per M05. Per M01 ed F01 si è invece verificato un allontanamento dal valore registrato alla visita 0: per M01 c'è

stato un aumento del ROM, il quale ha raggiunto il valore massimo (e più lontano dal fisiologico) in corrispondenza della visita 3, mentre per F01 c'è stata una prima diminuzione in corrispondenza della visita 2 seguita da un aumento alla visita 3, ed entrambe le oscillazioni hanno allontanato il valore del ROM dal fisiologico. Si riporta in **Figura 144** sotto forma di istogramma, l'andamento del ROM medio della caviglia patologica e della caviglia sana per ogni visita.

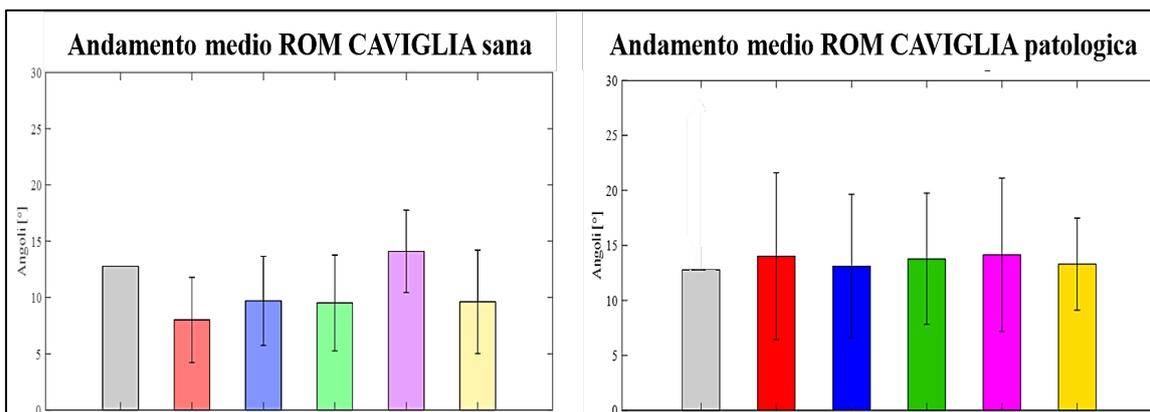


Figura 144. Andamento del ROM medio (sul piano trasversale) calcolato ad ogni visita per caviglia sana e caviglia patologica. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia rappresenta il valore fisiologico

6.5 Analisi dei parametri spazio-temporali post-iniezione di tossina botulinica

Nel precedente capitolo sono stati riportati per ciascun paziente i valori di alcuni parametri spazio temporali globali, quali cadenza, velocità, lunghezza del passo, larghezza del passo e tempo del passo, e i valori di alcuni parametri spazio temporali differenziati, quali percentuale di tempo speso in singolo supporto, percentuale di tempo speso in doppio supporto e Limp Index. Si è visto come, per quanto riguarda i parametri globali, alla visita 0 i pazienti risultassero avere tutti velocità, cadenza, e lunghezza del passo inferiori rispetto a quelle di un soggetto sano (di valori rispettivamente 1,37 [m/s], 110 [passi/min] e 1,44 [m] (Neumann, 2013)), e larghezza del passo superiore rispetto a quella di un soggetto sano (0,08-0,10 [m] (Neumann, 2013)). Si riportano nelle **Figure 144, 145, 146, 147, 148 e 149**, sotto forma di istogrammi, i valori dei parametri spazio temporali globali sopracitati, acquisiti prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30, 60, 90 e 120 dall'iniezione (visite 1-4).

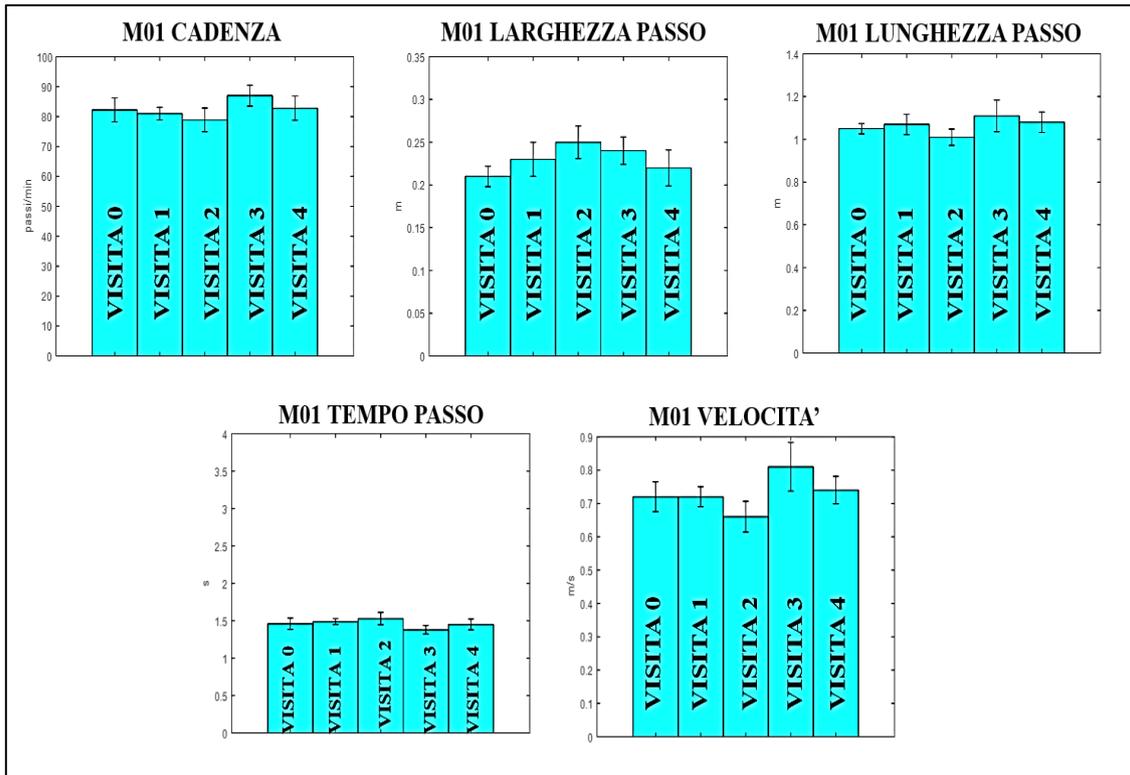


Figura 145. Parametri spazio temporali globali di M01 prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

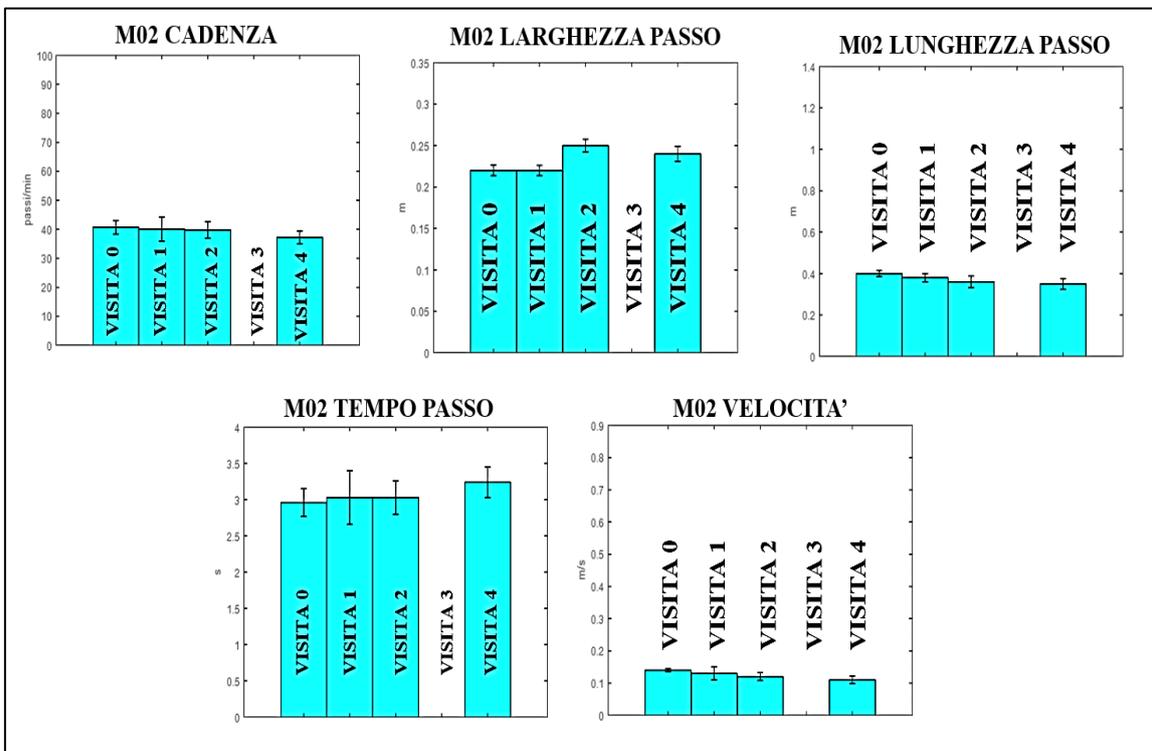


Figura 146 Parametri spazio temporali globali di M02 prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

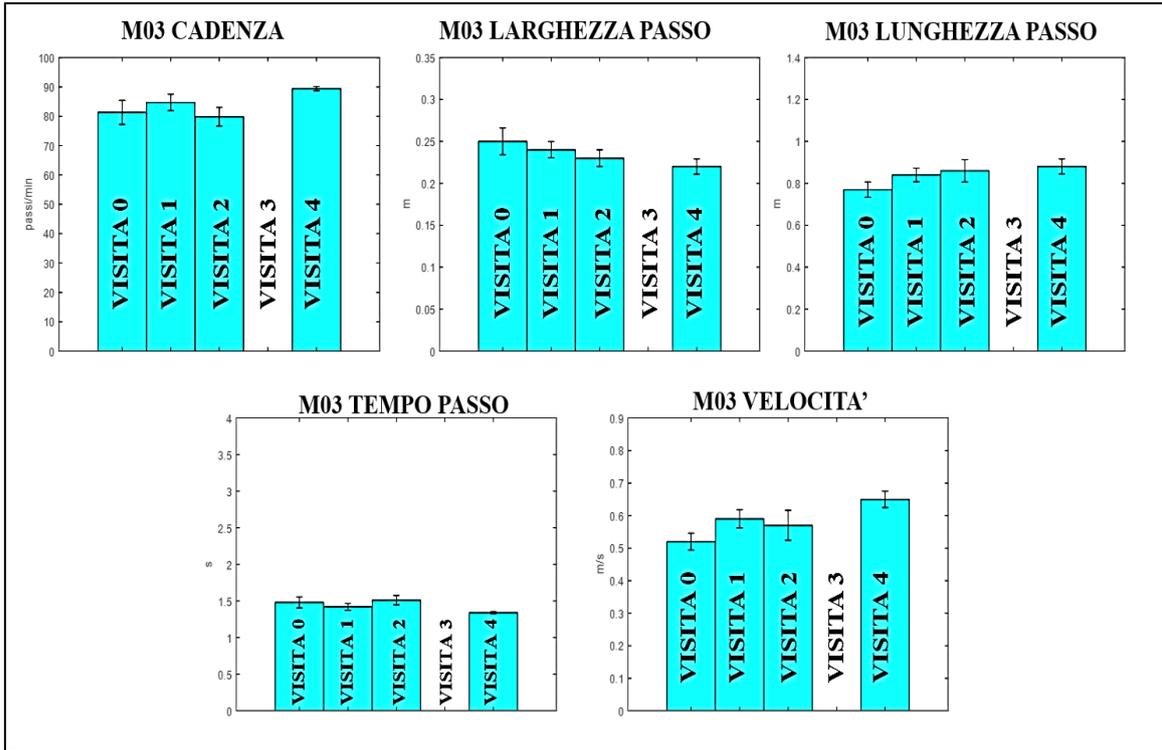


Figura 147. Parametri spazio temporali globali di M03 prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

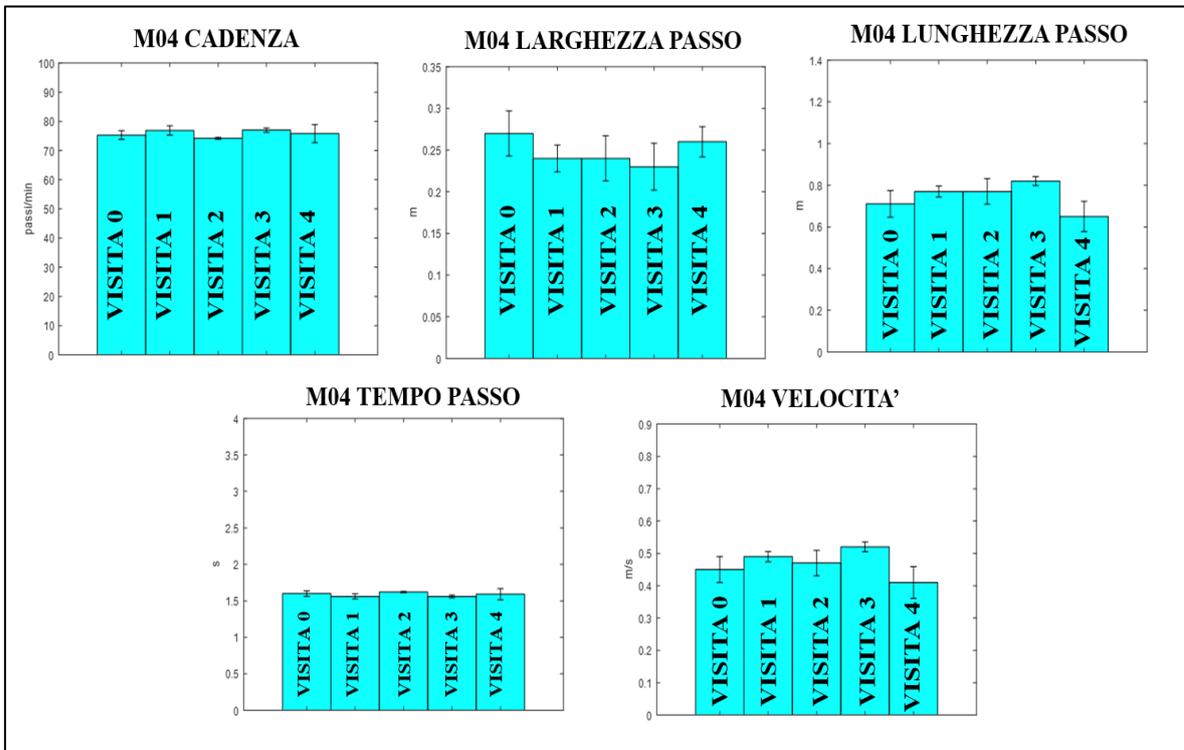


Figura 148 Parametri spazio temporali globali di M04 prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

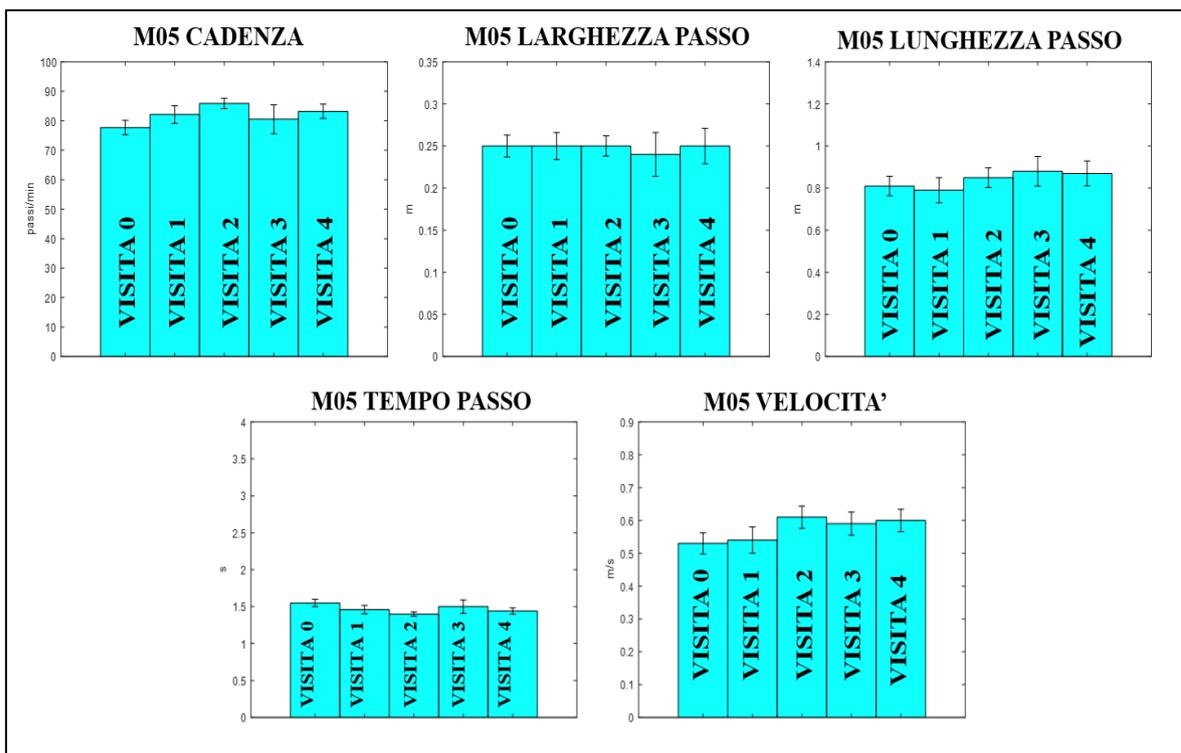


Figura 149. Parametri spazio temporali globali di M05 prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30, 60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

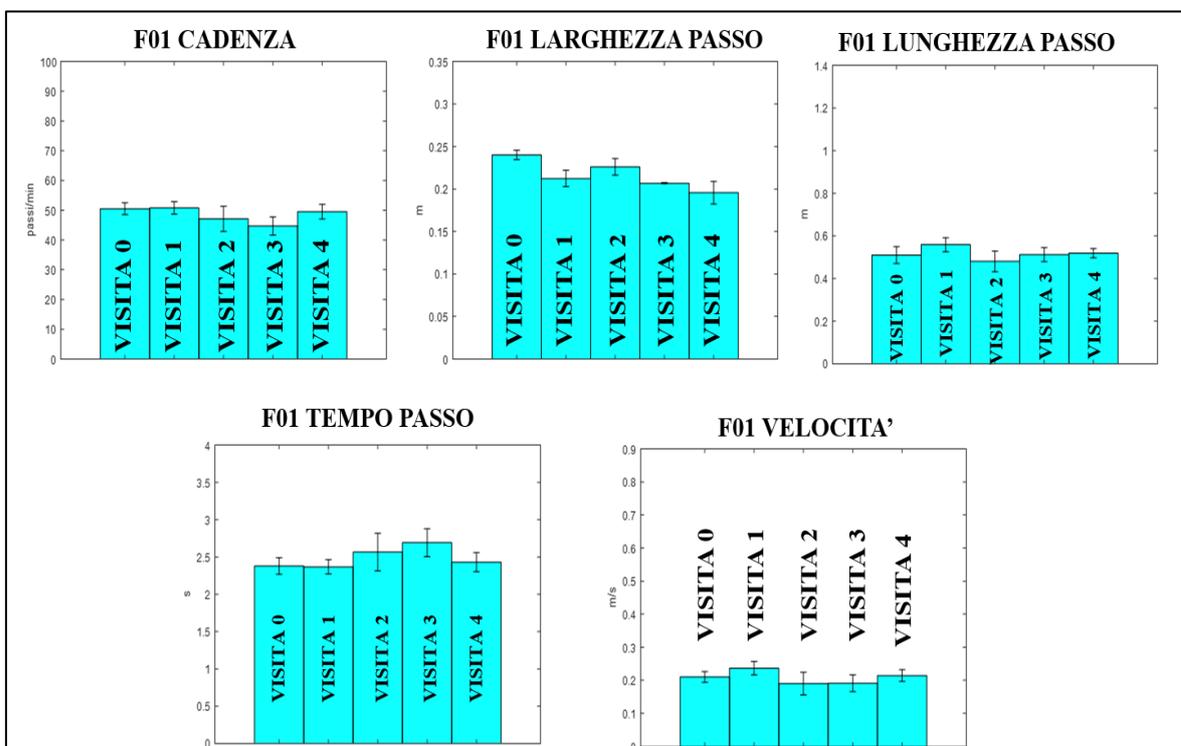


Figura 150. Parametri spazio temporali globali di F01 prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30, 60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).

Nel caso dei parametri spazio temporali globali, quanto si può vedere è che tutti i pazienti ad eccezione di M02 sono soggetti a: un aumento della velocità del passo, un aumento della cadenza, un aumento della lunghezza del passo e una diminuzione della larghezza del passo (quest'ultima per tutti ad eccezione di M01). In particolare: per il paziente M01 tutti i parametri ad eccezione della larghezza del passo (la quale mostra il valore migliore in corrispondenza della visita 0) raggiungono la massima vicinanza con i rispettivi valori fisiologici in corrispondenza della visita 3, mentre per F01 quest'ultima viene raggiunta alla visita 1 da tutti i parametri ad eccezione della larghezza del passo, la quale raggiunge il suo miglior valore alla visita 4. Tutti i parametri raggiungono la massima vicinanza con i rispettivi valori fisiologici in corrispondenza della visita 4 per il paziente M03 e della visita 3 per il paziente M04. Per quanto riguarda il tempo del passo, non si ha a disposizione il valore fisiologico, ma si può notare come questo diminuisca raggiungendo il valore minimo per ogni paziente in corrispondenza della visita alla quale si sono registrati i valori migliori per gli altri parametri: la diminuzione del tempo del passo è indice di una acquisizione di sicurezza nel cammino da parte del paziente.

Si riportano nelle **Figure 151, 152, 153, 154, 155 e 156**, sotto forma di istogrammi, i valori dei parametri spazio temporali valutati per l'arto sano e per l'arto patologico, acquisiti prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30, 60, 90 e 120 dall'iniezione (visite 1-4).

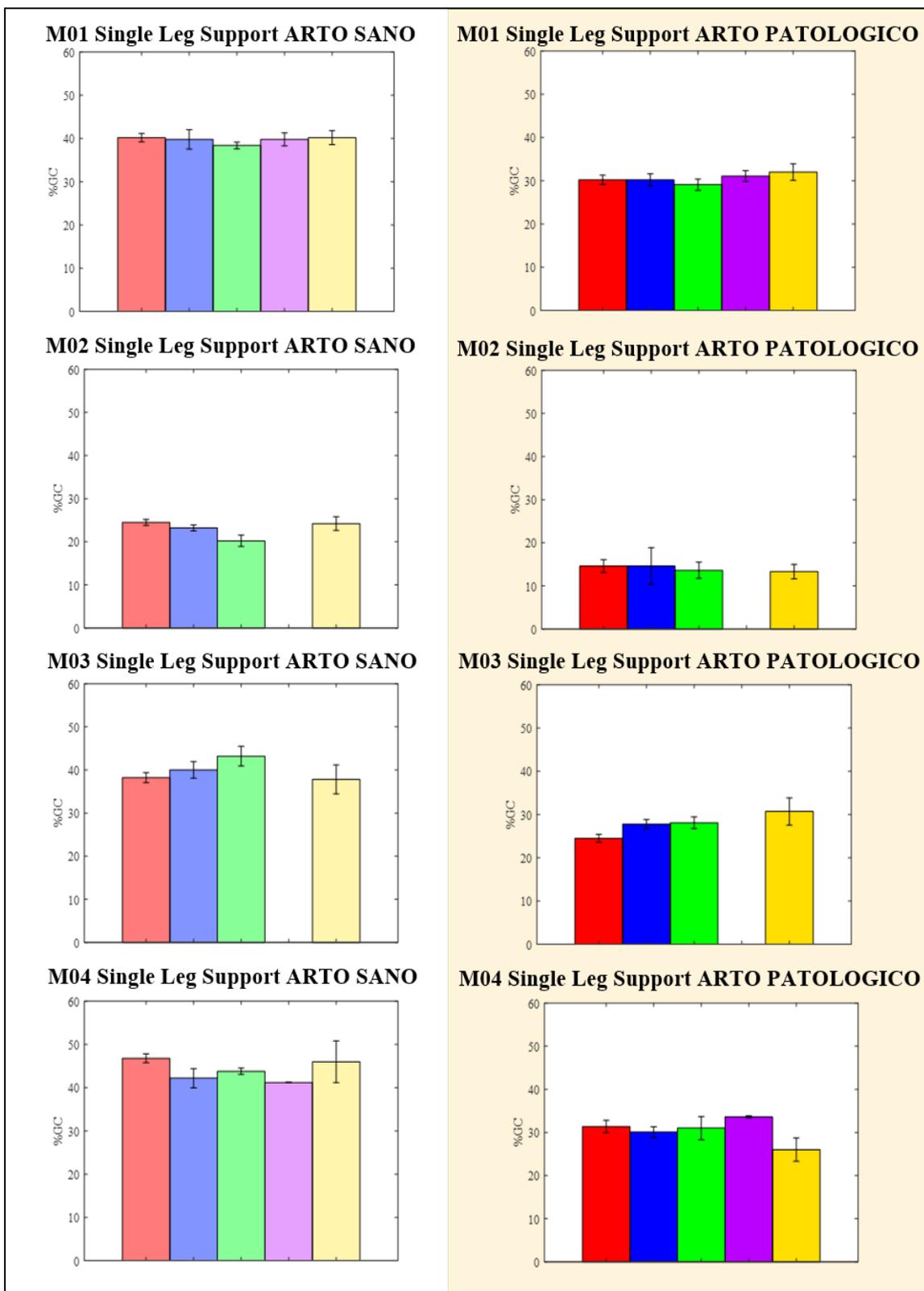


Figura 151. Percentuale del ciclo del passo spesa in singolo supporto (Single Leg Support) per i pazienti M01, M02, M03 ed M04 acquisita prima dell'iniezione di tossina botulinica (rosso) e a distanza di 30-60-90 e 120 giorni (rispettivamente blu, verde, viola e giallo).

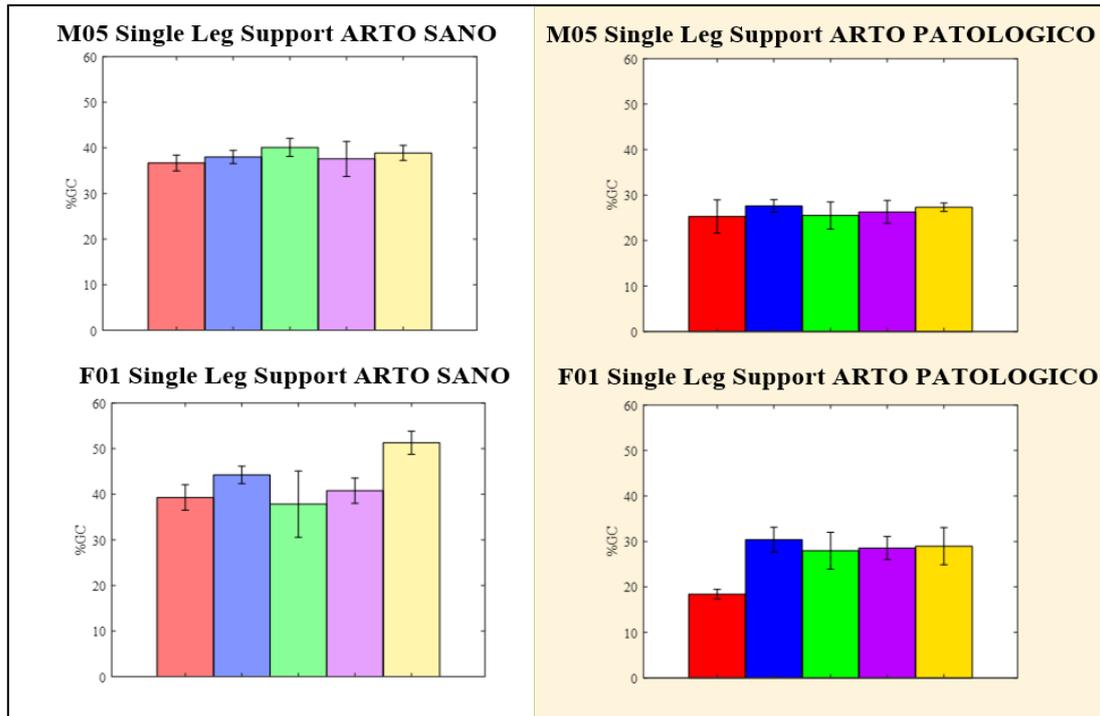


Figura 152. Percentuale del ciclo del passo spesa in singolo supporto (Single Leg Support) per i pazienti M05 ed F01 acquisita prima dell'iniezione di tossina botulinica (rosso) e a distanza di 30-60-90 e 120 giorni (rispettivamente blu, verde, viola e giallo).

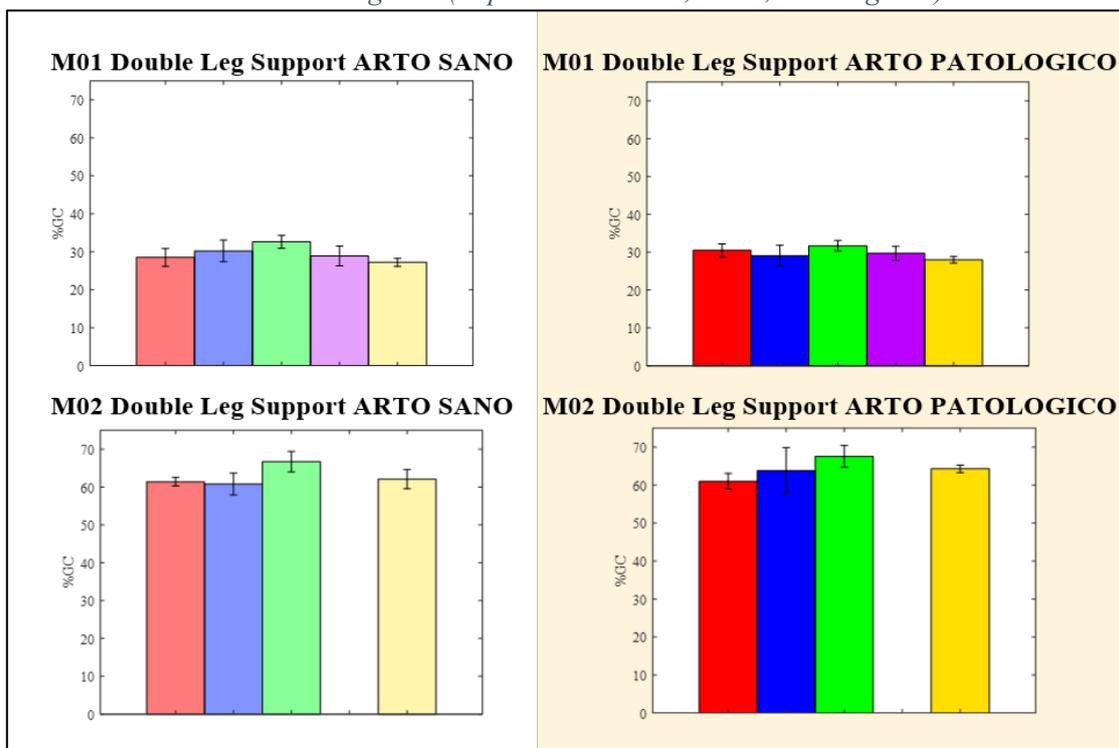


Figura 153. Percentuale del ciclo del passo spesa in doppio supporto (Double Leg Support) per i pazienti M01 ed M02 acquisita prima dell'iniezione di tossina botulinica (rosso) e a distanza di 30-60-90 e 120 giorni (rispettivamente blu, verde, viola e giallo).

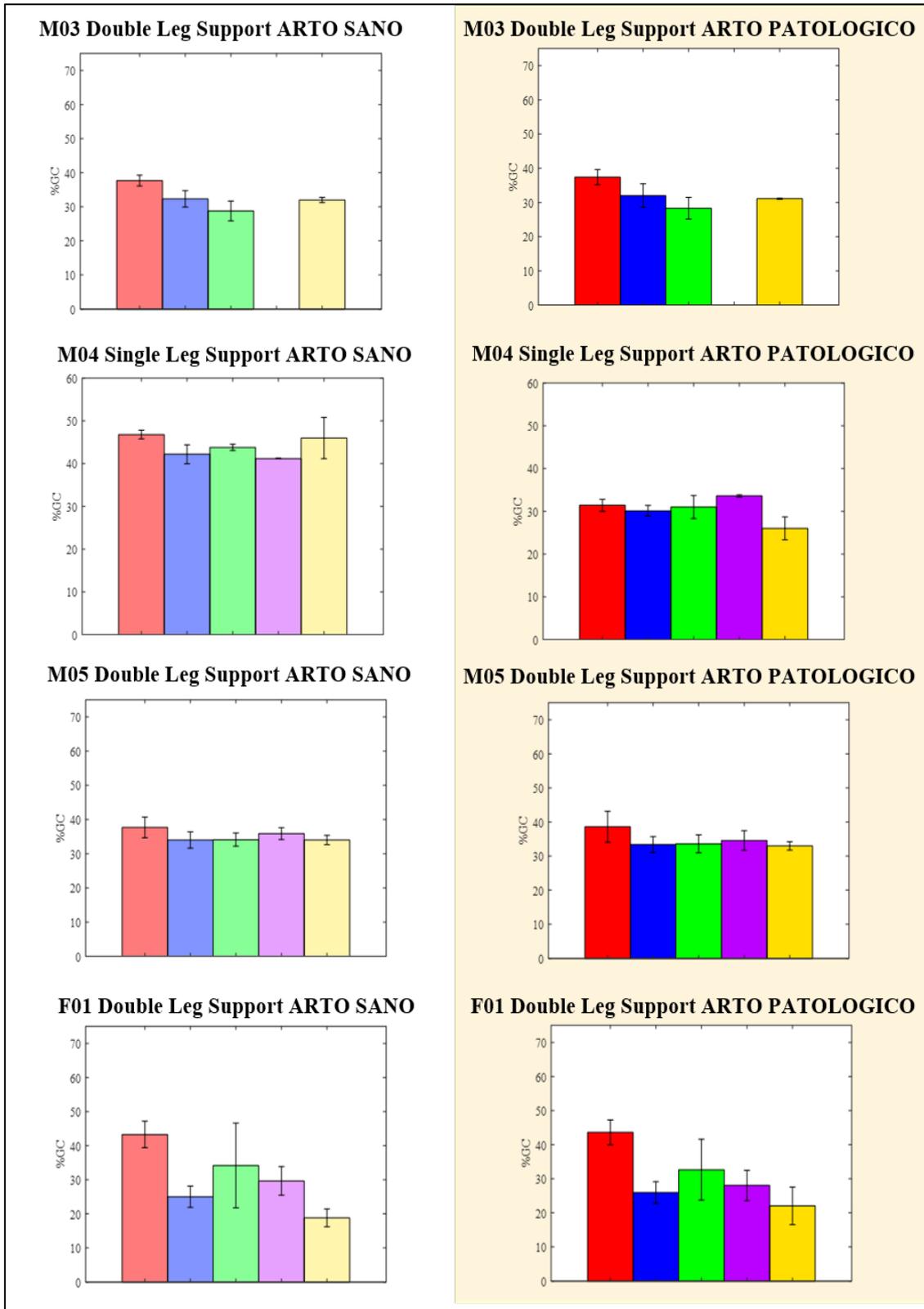


Figura 154. Percentuale del ciclo del passo spesa in doppio supporto (Double Leg Support) per i pazienti M03, M04, M05 ed F01 acquisita prima dell'iniezione di tossina botulinica (rosso) e a distanza di 30-60-90 e 120 giorni (rispettivamente blu, verde, viola e giallo).

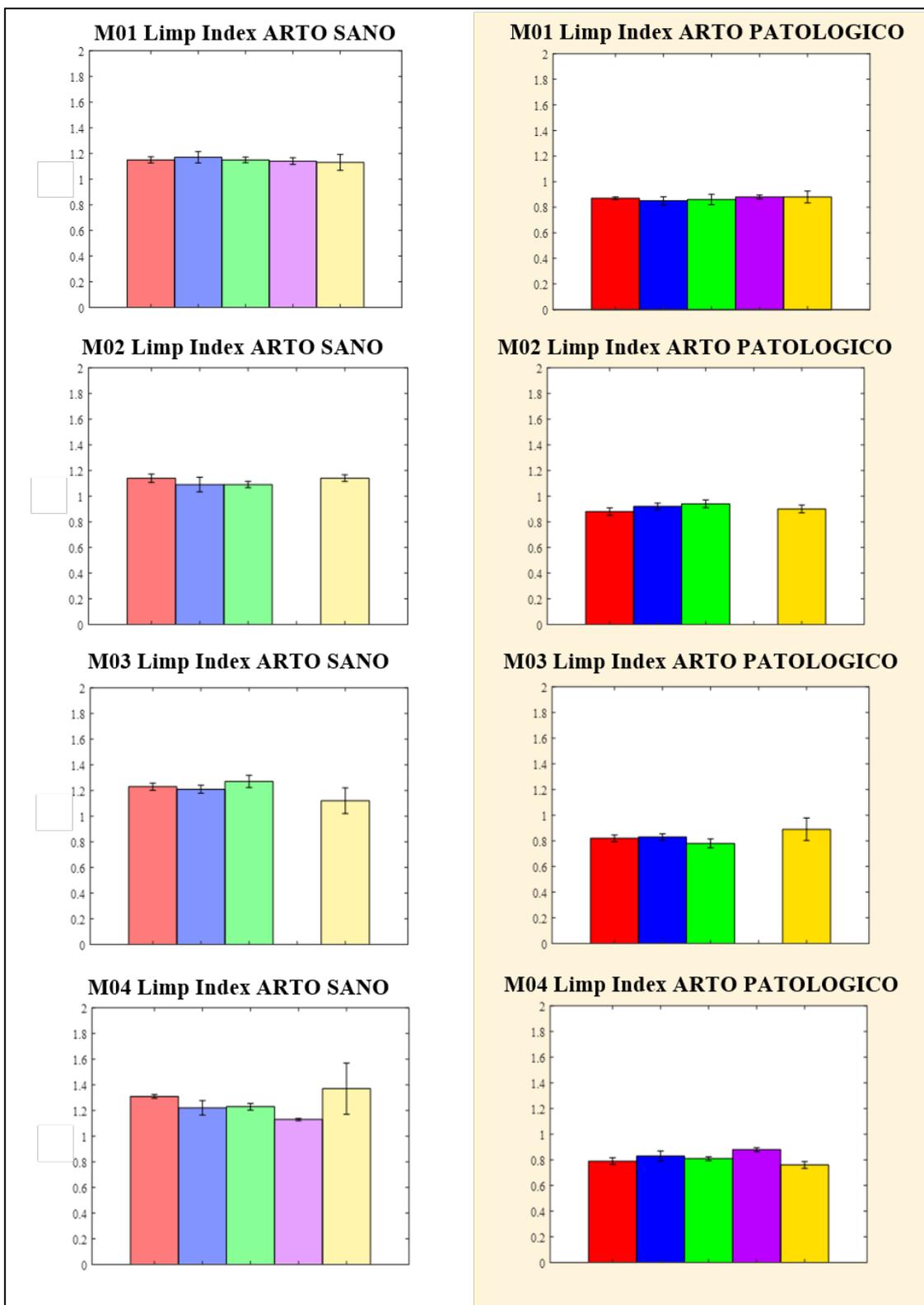


Figura 155. Limp index per i pazienti M01, M02, M03 ed M04 acquisito prima dell'iniezione di tossina botulinica (rosso) e a distanza di 30-60-90 e 120 giorni (rispettivamente blu, verde, viola e giallo).

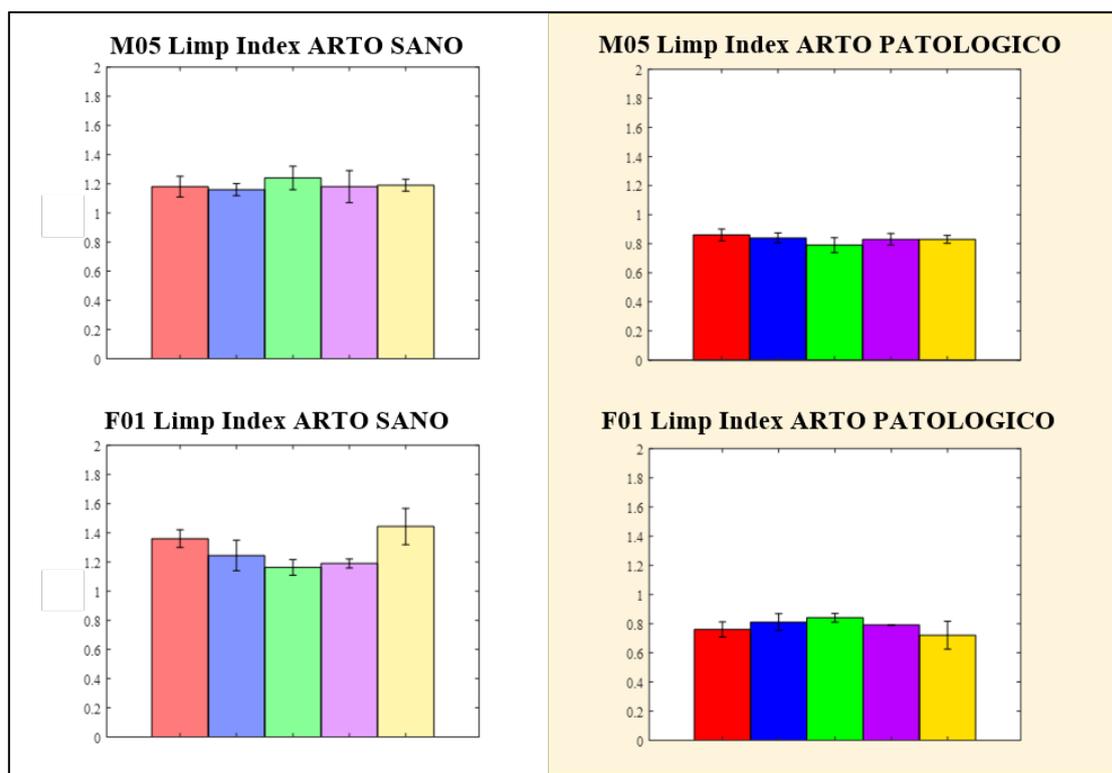


Figura 156. Limp index per i pazienti M05 ed F01 acquisito prima dell'iniezione di tossina botulinica (rosso) e a distanza di 30-60-90 e 120 giorni (rispettivamente blu, verde, viola e giallo).

Per quanto riguarda i parametri spazio temporali valutati per il singolo arto, alla visita 0 si era visto che tutti i pazienti ad eccezione di M01 mostravano per l'arto patologico una percentuale di tempo speso in singolo supporto minore del 40% (valore fisiologico), e tutti i pazienti, ad eccezione di M04, mostravano per l'arto patologico una percentuale di tempo speso in doppio supporto superiore al 20% (valore fisiologico). Inoltre, per tutti si era visto come il limp index fosse superiore ad 1 per l'arto sano ed inferiore ad 1 per l'arto patologico.

Come si può vedere dalle **Figure 151 e 152**, la percentuale di tempo speso in singolo supporto per l'arto patologico aumenta per tutti i pazienti, ad eccezione di M02 (per il quale diminuisce), raggiungendo il valore più vicino al 40% in corrispondenza della visita 4 per M01 ed M03, della visita 3 per M04 e della visita 1 per M05 ed F01.

Per quanto riguarda invece la percentuale di tempo spesa in doppio supporto, facendo riferimento alle **Figure 153 e 154**, questa diminuisce per tutti i pazienti ad eccezione di M02 (per il quale aumenta) raggiungendo il valore più vicino al 20% in corrispondenza della visita 4 per M01, M04, M05 ed F01 e della visita 2 per M03.

Nel caso del Limp index, si vede dalle **Figure 155 e 156** come per l'arto patologico esso aumenti, raggiungendo il valore più vicino ad 1 in corrispondenza della visita 4 per M01

ed M03, della visita 2 per M02 ed F01 e della visita 3 per M04. Per M05 invece esso subisce un'ulteriore diminuzione, raggiungendo il valore più lontano da 1 in corrispondenza della visita 2. Nel caso dell'arto sano si ha invece una diminuzione del Limp Index, con il raggiungimento del valore più vicino ad 1 in corrispondenza della visita 4 per M01 ed M03, della visita 1 per M02, della visita 3 per M04 e della visita 2 per F01. Per M05, si ha una iniziale diminuzione alla visita 1, seguita da un aumento fino ad un valore più alto di quanto della visita 0 registrato in corrispondenza della visita 2.

6.6 Quadro riassuntivo delle osservazioni

Le analisi effettuate all'interno di questo capitolo hanno riguardato l'evoluzione di parametri cinematici e spazio temporali a seguito dell'iniezione di tossina botulinica in uno dei muscoli della gamba affetto da spasticità post-ictus, per pazienti con piede equinovaro. I parametri cinematici osservati sono: la posizione dei punti significativi delle curve di anca, ginocchio e caviglia rispetto alla posizione degli stessi punti sulle rispettive curve fisiologiche e l'escursione tra essi, confrontata anch'essa con l'escursione di riferimento acquisita sulla curva fisiologica. I parametri spazio temporali osservati si dividono in parametri globali quali la cadenza, la velocità, la lunghezza, la larghezza e il tempo del passo e parametri differenziati, quali la percentuale di tempo spesa in singolo e in doppio supporto ed il Limp index. Anche nel caso dei parametri spazio temporali è stato possibile fare un confronto con dei valori provenienti dalla letteratura.

All'interno di ogni sotto capitolo si sono evidenziate inoltre, per ogni paziente, le visite in corrispondenza delle quali sia i parametri cinematici che i parametri spazio temporali, si sono avvicinati maggiormente al loro valore fisiologico (**Tabelle 25, 26, 27 e 28**).

Da una prima analisi sulle sole **Tabelle 25 e 26** si vede come risulti difficile identificare se vi siano parametri che risentano maggiormente dell'effetto della tossina rispetto ad altri, poiché tutti mostrano dei miglioramenti. Per il solo arto patologico, nel caso del picco di estensione in fase di appoggio del ginocchio, per cinque pazienti la condizione migliore si verifica alla visita 0, e questo implica la maggior parte dei pazienti abbia subito un peggioramento anziché un miglioramento su questo parametro.

In riferimento alla **Tabella 25** è possibile identificare per l'arto patologico quale sia la visita alla quale, per il maggior numero di parametri, si è registrato il valore più vicino al proprio valore di riferimento ("situazione migliore"). Quanto emerge è che per quattro pazienti su sei, la visita in questione è la visita 1; fanno eccezione M01 per il quale è la visita 0 (questo implica che i parametri cinematici nella maggior parte dei casi peggiorino rispetto al pre-iniezione) ed M04 per il quale è la visita 3. Quindi, per quanto riguarda la

cinematica articolare di anca, ginocchio e caviglia patologiche, gli effetti della tossina botulinica sono visibili per la maggior parte dei pazienti in corrispondenza della visita 1. Lo stesso discorso può essere fatto in merito alla **Tabella 26**, all'interno della quale è possibile identificare per l'arto sano di ogni paziente la visita in corrispondenza della quale si è registrato il valore più vicino al fisiologico per il maggior numero di parametri. In questo caso ciò accade alla visita 1 per i pazienti M01, M04 ed F01, alla visita 2 per M02 ed M03 e alla visita 3 per M05. Quindi per l'arto sano, alcuni pazienti risultano sentire maggiormente gli effetti della tossina in corrispondenza delle visite 2 e 3 oltre che alla visita 1.

Per quanto riguarda il piano trasversale, si riportano in **Tabella 27** le visite sia per arto sano che per arto patologico in corrispondenza delle quali si è registrato il valore di ROM più prossimo al fisiologico. In questo caso il paziente M02 è soggetto ad un peggioramento per entrambi gli arti, mentre per la sola caviglia patologica si hanno quattro pazienti per cui la situazione migliore è in corrispondenza della visita 2 e uno per cui è in corrispondenza della visita 4. Per la caviglia sana invece, per M01, M05 ed F01 il maggiore avvicinamento del valore del ROM al fisiologico si ha in corrispondenza della visita 1, mentre per M03 ed M04 alla visita 2.

In riferimento ai parametri spazio temporali, guardando la **Tabella 28** si vede come per ogni paziente vi sia una visita diversa in corrispondenza della quale il maggior numero di parametri raggiunge il valore più prossimo al rispettivo valore di riferimento. In particolare, per i pazienti M01 ed M04 questo si verifica in corrispondenza della visita 3, per M03 in corrispondenza della visita 4, per M05 in corrispondenza della visita 2 e per F01 in corrispondenza della visita 1. Il paziente M02 è l'unico a mostrare dei peggioramenti, e quindi l'unico per il quale la situazione migliore in termini di parametri spazio temporali corrisponda alla visita 0.

Al fine di verificare eventuali similitudini tra l'evoluzione dei parametri cinematici e quella dei parametri spazio temporali, sono stati confrontati i loro andamenti nel tempo senza riscontrare alcuna somiglianza apprezzabile tra essi. Ulteriormente, per il solo arto patologico si è effettuato un confronto tra le visite riportate in **Tabella 28** e quelle riportate in **Tabella 28**: quanto visto è che per i soli pazienti F01 ed M04 si ha una corrispondenza, in quanto per F01 alla visita 1 si verifica la situazione migliore sia in termini di parametri cinematici (per l'arto patologico) che di parametri spazio temporali (globali e per l'arto patologico), mentre per M04 tale concomitanza si riscontra in corrispondenza della visita 3. Una corrispondenza simile si è vista per il paziente M02, il quale, registrando soltanto allontanamenti dal fisiologico sia per il ROM sul piano trasversale (caviglia patologica), sia per i parametri spazio-temporali (arto patologico),

risulta avere in corrispondenza della visita 0 la situazione migliore in termini sia di cinematica sul piano trasversale che di parametri spazio-temporali.

	CINEMATICA DELL'ANCA PATOLOGICA						CINEMATICA DEL GINOCCHIO PATOLOGICO						CINEMATICA DELLA CAVIGLIA PATOLOGICA					
	Fase di appoggio			Fase di pendolamento			Fase di appoggio			Fase di pendolamento			Fase di appoggio			Fase di pendolamento		
	Picco di flessione	Picco di estensione	Misura di flessione	Picco di flessione	Picco di estensione	Misura di flessione	Picco di flessione	Picco di estensione	Misura di flessione	Picco di flessione	Picco di estensione	Misura di flessione	Picco di flessione	Picco di estensione	Misura di flessione	Picco di flessione	Picco di estensione	Misura di flessione
M01	VISITA 0	VISITA 3	VISITA 4	VISITA 0	VISITA 3	VISITA 4	VISITA 0	VISITA 3	VISITA 4	VISITA 0	VISITA 3	VISITA 4	VISITA 2	VISITA 3	VISITA 4	VISITA 0	VISITA 3	VISITA 4
M02	VISITA 2	VISITA 4	VISITA 2	VISITA 0	VISITA 4	VISITA 2	VISITA 1	VISITA 4	VISITA 2	VISITA 1	VISITA 4	VISITA 2	VISITA 1	VISITA 4	VISITA 2	VISITA 1	VISITA 4	VISITA 2
M03	VISITA 1	VISITA 0	VISITA 4	VISITA 1	VISITA 4	VISITA 1	VISITA 4	VISITA 1	VISITA 4	VISITA 1	VISITA 4	VISITA 1	VISITA 4	VISITA 1	VISITA 4	VISITA 1	VISITA 4	VISITA 1
M04	VISITA 1	VISITA 3	VISITA 3	VISITA 1	VISITA 3	VISITA 3	VISITA 1	VISITA 3	VISITA 3	VISITA 1	VISITA 3	VISITA 3	VISITA 1	VISITA 3	VISITA 3	VISITA 1	VISITA 3	VISITA 3
M05	VISITA 3	VISITA 4	VISITA 3	VISITA 2	VISITA 3	VISITA 2	VISITA 1	VISITA 3	VISITA 2	VISITA 1	VISITA 3	VISITA 2	VISITA 1	VISITA 3	VISITA 2	VISITA 1	VISITA 3	VISITA 2
F01	VISITA 0	VISITA 2	VISITA 3	VISITA 1	VISITA 2	VISITA 3	VISITA 0	VISITA 2	VISITA 3	VISITA 1	VISITA 2	VISITA 3	VISITA 0	VISITA 2	VISITA 3	VISITA 1	VISITA 2	VISITA 3

Tabella 25. Evidenziazione delle visite alle quali i parametri cinematici (sul piano sagittale) per l'arto patologico si avvicinano di più ai rispettivi valori fisiologici. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4.

	CINEMATICA DELL'ANCA SANA						CINEMATICA DEL GINOCCHIO SANA						CINEMATICA DELLA CAVIGLIA SANA					
	Fase di appoggio			Fase di pendolamento			Fase di appoggio			Fase di pendolamento			Fase di appoggio			Fase di pendolamento		
	Picco di flessione	Misura di estensione	Misura di flessione	Picco di flessione	Misura di estensione	Misura di flessione	Picco di flessione	Misura di estensione	Misura di flessione	Picco di flessione	Misura di estensione	Misura di flessione	Picco di flessione	Misura di estensione	Misura di flessione	Picco di flessione	Misura di estensione	Misura di flessione
M01	VISITA 0	VISITA 0	VISITA 0	VISITA 0	VISITA 4	VISITA 4	VISITA 1	VISITA 1	VISITA 4	VISITA 3	VISITA 4	VISITA 1	VISITA 1	VISITA 4	VISITA 1	VISITA 3	VISITA 3	VISITA 1
M02	VISITA 0	VISITA 2	VISITA 4	VISITA 4	VISITA 2	VISITA 4	VISITA 1	VISITA 2	VISITA 1	VISITA 0	VISITA 1	VISITA 1	VISITA 0	VISITA 4	VISITA 2	VISITA 2	VISITA 4	VISITA 2
M03	VISITA 1	VISITA 2	VISITA 4	VISITA 4	VISITA 2	VISITA 2	VISITA 0	VISITA 2	VISITA 2	VISITA 2	VISITA 2	VISITA 2	VISITA 0	VISITA 4	VISITA 2	VISITA 0	VISITA 2	VISITA 2
M04	VISITA 4	VISITA 2	VISITA 1	VISITA 2	VISITA 3	VISITA 3	VISITA 1	VISITA 3	VISITA 1	VISITA 0	VISITA 3	VISITA 3	VISITA 2	VISITA 2	VISITA 0	VISITA 0	VISITA 1	VISITA 1
M05	VISITA 3	VISITA 2	VISITA 3	VISITA 3	VISITA 3	VISITA 3	VISITA 3	VISITA 2	VISITA 3	VISITA 2	VISITA 2	VISITA 2	VISITA 2	VISITA 1	VISITA 4	VISITA 3	VISITA 3	VISITA 3
F01	VISITA 2	VISITA 4	VISITA 1	VISITA 2	VISITA 1	VISITA 1	VISITA 1	VISITA 4	VISITA 0	VISITA 1	VISITA 1	VISITA 1	VISITA 1	VISITA 3	VISITA 1	VISITA 1	VISITA 1	VISITA 1

Tabella 26. Evidenziazione delle visite alle quali i parametri cinematici (sul piano sagittale) per l'arto sano si avvicinano di più ai rispettivi valori fisiologici. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita

4.

ROM CAVIGLIA (Piano trasversale)		
	Caviglia patologica	Caviglia sana
M01	VISITA 4	VISITA 1
M02	VISITA 0	VISITA 0
M03	VISITA 2	VISITA 2
M04	VISITA 2	VISITA 2
M05	VISITA 2	VISITA 1
F01	VISITA 2	VISITA 1

Tabella 27. Evidenziazione delle visite alle quali il ROM della caviglia sul piano trasversale si avvicina di più al valore fisiologico. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4.

	PARAMETRI SPAZIO TEMPORALI GLOBALI					PARAMETRI SPAZIO TEMPORALI PER ARTO PATOLOGICO			
	Cadenza [passi/min]	Larghezza passo [m]	Lunghezza passo [m]	Tempo passo [s]	Velocità [m/s]	Single Leg support [%GC]	Double Leg support [%GC]	Limp Index	
M01	VISITA 3	VISITA 0	VISITA 3	VISITA 3	VISITA 3	VISITA 4	VISITA 4	VISITA 4	
M02	VISITA 0	VISITA 0	VISITA 0	VISITA 0	VISITA 0	VISITA 0	VISITA 0	VISITA 2	
M03	VISITA 4	VISITA 4	VISITA 4	VISITA 4	VISITA 4	VISITA 4	VISITA 2	VISITA 4	
M04	VISITA 3	VISITA 3	VISITA 3	VISITA 3	VISITA 3	VISITA 3	VISITA 4	VISITA 3	
M05	VISITA 2	VISITA 3	VISITA 3	VISITA 2	VISITA 2	VISITA 1	VISITA 4	VISITA 0	
F01	VISITA 1	VISITA 4	VISITA 1	VISITA 1	VISITA 1	VISITA 1	VISITA 4	VISITA 2	

Tabella 28. Evidenziazione delle visite alle quali i parametri spazio-temporali si avvicinano di più ai rispettivi valori fisiologici. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4.

Capitolo 7

Discussione

I risultati ottenuti all'interno di questa tesi fanno riferimento alla condizione di spasticità post-ictus per pazienti con piede equinovaro prima e dopo l'iniezione di tossina botulinica. Le valutazioni effettuate prima dell'iniezione (visita 0) avevano lo scopo verificare se vi fossero delle caratteristiche comuni per la cinematica e per i parametri spazio temporali all'interno del gruppo di pazienti, nonché di fornire un valore di riferimento con cui poter confrontare i risultati ottenuti alle visite successive per evidenziare eventuali miglioramenti (o peggioramenti) causati dalla tossina.

Per la cinematica di anca e ginocchio patologici sul piano sagittale, l'unico riferimento trovato in letteratura riguarda la **massima estensione del ginocchio in fase di appoggio**, che Bollens et al. (2013) in uno studio condotto su otto pazienti con piede equinovaro post ictus hanno trovato essere di $4,4 \pm 26,82$ [°]. Nella presente tesi, per un solo paziente su sei il valore si avvicina a quest'ultimo, per quattro di essi risulta essere molto minore e per uno risulta essere maggiore (e corrispondente al valore fisiologico). Questa differenza potrebbe essere dovuta al fatto che cinque dei pazienti oggetto di studio presentano in corrispondenza della visita 0 una iper-estensione di ginocchio, la quale secondo Neumann (2013) si verifica perché il paziente cerca di forzare il calcagno a venire a contatto con il suolo.

Sempre Bollens et al.(2013) avevano trovato per il **massimo valore di plantiflessione in fase di appoggio** un risultato pari a $-6,8 \pm 8,6$ [°], mentre Benedetti et al. (2011), in uno studio su cinque pazienti con piede equinovaro post-ictus avevano trovato un valore pari a $-19 \pm 12,59$ [°]. In questa tesi, si è visto come per tutti i pazienti ad eccezione di uno, il massimo valore di plantiflessione in fase di appoggio si abbia in corrispondenza dello 0% del ciclo del ciclo del passo, ed i valori sono per quattro pazienti su sei negativi, ma solo uno di essi si avvicina a quello proposto da Bollens et al. (2013), mentre un altro si avvicina al valore proposto da Benedetti et al. (2011), per tutti gli altri risultano maggiori. Dal momento che, come già detto, la maggior parte dei pazienti inizia il ciclo del passo con il piede già in plantiflessione, è possibile che le differenze in termini di angoli dipendano dalla severità della deformità a cui il singolo paziente è soggetto.

Sempre per la caviglia patologica sul piano sagittale, per la **massima dorsiflessione in fase di appoggio** i valori ottenuti in questa tesi risultano per la maggior parte dei pazienti

maggiori sia a quello trovato da Bollens et al.(2013) di $6,8 \pm 9,7$ [°], sia di quello trovato da Benedetti et al.(2011) di $-5,66 \pm 14,7$ [°].

Per quanto riguarda invece la **massima dorsiflessione in fase di pendolamento**, Bollens et al.(2013) hanno trovato un valore di $-6,6 \pm 8,8$ [°]. In questo caso, il confronto con i risultati ottenuti in questa tesi può essere fatto soltanto per due dei sei pazienti, in quanto per gli altri quattro la forma delle curve in due casi ha una discesa partendo dal picco di dorsiflessione in appoggio fino alla fine del ciclo del passo, e negli altri due è piatta dal picco di plantiflessione in pendolamento fino alla fine del ciclo. Nei due pazienti che presentano un vero e proprio picco, il valore risulta molto più alto di quello proposto da Bollens et al.(2013).

Rimanendo sul piano sagittale, Benedetti et al.(2011) hanno trovato per il **ROM della caviglia patologica** un valore di $22,34 \pm 12,72$ [°], che risulta maggiore rispetto a quello della maggior parte dei pazienti analizzati in questa tesi. Bensoussan et al.(2006), in uno studio su 3 soggetti con piede equinovaro post-ictus, hanno anche visto come il ROM della caviglia patologica ($31 \pm 7,5$ [°]) risulti maggiore rispetto a quello della caviglia sana, per il quale hanno trovato un valore di $22,9 \pm 8,8$ [°]. Nella presente tesi, sebbene la maggior parte dei pazienti presenti alla visita 0 un valore di ROM della caviglia sana simile a quello sopraccitato, soltanto per due di essi quest'ultimo è inferiore rispetto a quello della caviglia patologica. Dal momento che Bensoussan et al.(2006) avevano attribuito questo più alto valore del ROM della caviglia patologica all'alto livello di spasticità dei muscoli, è possibile presumere che anche per i pazienti oggetto di questo studio il diverso livello di spasticità sia la causa di queste differenze.

Per quanto riguarda invece il **ROM sul piano frontale** ed il **ROM sul piano trasversale**, per la sola caviglia patologica Benedetti et al.(2011) hanno calcolato dei valori rispettivamente di: $18,31 \pm 10,70$ [°] e $21,45 \pm 10,59$ [°]. I valori di ROM frontale e sagittale trovati per i soggetti oggetto della presente tesi risultano minori.

In riferimento ai **miglioramenti attesi a seguito dell'iniezione di tossina botulinica** per la cinematica articolare, Bollens et al.(2013) avevano riscontrato: un innalzamento del picco di estensione in fase di appoggio per il ginocchio patologico a due mesi dall'iniezione, un lieve abbassamento del picco di plantiflessione in appoggio per la caviglia patologica a distanza di due mesi dall'iniezione della tossina e un innalzamento del picco di dorsiflessione in fase di appoggio a due mesi dall'iniezione.

Per quanto riguarda l'innalzamento del picco di estensione in fase di appoggio, per la maggior parte dei pazienti di questa tesi la tendenza risulta opposta, in quanto il picco anziché alzarsi tende ad abbassarsi maggiormente, provocando (o in alcuni casi aggravando se già presente alla visita 0) una iper-estensione.

Nel caso invece dell'abbassamento del picco di plantiflessione in appoggio per la caviglia patologica, per i soggetti oggetto di questo studio ad eccezione di un solo, ci si trova in accordo con questa tendenza in quanto il picco di plantiflessione si abbassa ulteriormente nel tempo.

Infine, per l'innalzamento del picco di dorsiflessione in fase di appoggio, soltanto tre dei pazienti di questa tesi presentano questa tendenza mentre per gli altri vi è una discesa del picco, seguita da una risalita a valori simili a quelli mostrati prima dell'iniezione.

Da un punto di vista globale, i risultati della cinematica per i sei pazienti oggetto di questo studio indicano che: per l'arto patologico la maggior parte dei pazienti ha risentito maggiormente dell'effetto della tossina in corrispondenza della visita 1, per l'arto sano invece tre pazienti hanno risentito maggiormente degli effetti alla visita 1, due alla visita 2 e uno alla visita 3. Questi risultati, sia per l'arto sano che per l'arto patologico, sono in parte concordi con l'andamento dell'efficacia della tossina botulinica presentato da Jacinto et al.(2020) e riportato nel capitolo 2 (**Figura 37**), per il quale il picco di efficacia della tossina viene raggiunto in corrispondenza della quinta settimana post iniezione, ma la ri-emersione dei sintomi si ha mediamente dopo 12,8 settimane. Nel presente studio il picco dell'efficacia viene effettivamente raggiunto per la maggior parte dei pazienti per entrambi gli arti tra la visita 1 e la visita 3, quindi tra le 4 e le 12 settimane post iniezione, ma per quanto riguarda la diminuzione dell'efficacia della tossina, in questo caso per alcuni pazienti anche a distanza di 120 giorni dall'iniezione (circa 16 settimane) si verificano ancora dei miglioramenti.

È necessario sottolineare che gli studi citati, così come la presente tesi, dispongono di un numero molto limitato di pazienti (inferiore a dieci), motivo per cui i dati riportati possono risultare molto diversi tra loro in quanto non ottenuti come media di una vasta popolazione di soggetti e quindi con alta possibilità di bias dovuto alle particolari condizioni di ciascun soggetto oggetto di studio.

Per quanto riguarda infine i **parametri spazio temporali globali** acquisiti pre-iniezione di tossina botulinica, Benedetti et al.(2011) (nello stesso studio citato in precedenza sempre all'interno di questo capitolo, ma con una popolazione di 15 soggetti anziché 5) avevano trovato: un valore di $65,57 \pm 25,31$ [cm] per la lunghezza del passo, un valore di $2,07 \pm 0,75$ [s] per il tempo del passo, un valore di $31,70 \pm 8,32$ [passi/min] per la cadenza, e un valore di $35,54 \pm 17,25$ [cm/s] per la velocità. La maggior parte dei pazienti oggetto di questo studio, prima dell'iniezione di tossina botulinica risulta avere dei valori maggiori di velocità, cadenza e lunghezza del passo rispetto a quelli sopracitati, e conseguentemente valori minori di tempo del passo.

Capitolo 8

Conclusioni

L'obiettivo della presente tesi è consistito nella valutazione dei cambiamenti indotti dall'iniezione di tossina botulinica su pazienti post-ictus con piede equinovaro, in termini sia di cambiamenti nelle curve cinematiche di anca, ginocchio e caviglia che di cambiamenti nei parametri spazio temporali acquisiti durante il cammino. Sei pazienti sono stati valutati prima dell'iniezione di tossina botulinica nel muscolo della gamba affetto da spasticità, e successivamente a distanza di 30, 60, 90 e 120 giorni da essa, ricavando in corrispondenza di ogni visita: il valore dei punti significativi delle curve cinematiche (massima flessione e massima estensione per la fase di appoggio e per la fase di pendolamento), l'escursione tra i suddetti punti (ampiezza dell'estensione e della flessione nelle fasi di appoggio e pendolamento), alcuni parametri spazio temporali globali (velocità, cadenza, lunghezza, larghezza e tempo del passo) e alcuni parametri spazio temporali differenziati (durata delle fasi di singolo e doppio supporto e Limp Index).

Tutti i parametri cinematici hanno mostrato un avvicinamento ai loro rispettivi valori fisiologici, registrando però la massima vicinanza ad essi in momenti diversi, per i diversi pazienti, all'interno dell'arco temporale in cui si è condotto lo studio. Dato il basso numero di soggetti e la varietà dei risultati ottenuti, non è stato possibile capire su quali parametri la tossina botulinica abbia avuto più effetto. Tuttavia, ad eccezione del valore di massima estensione del ginocchio patologico in fase di appoggio, per il quale nella maggior parte dei pazienti si è notato un peggioramento a seguito dell'iniezione, tutti i parametri hanno risentito positivamente dell'effetto della tossina.

Identificando per ogni paziente quale fosse la visita in corrispondenza della quale il maggior numero di parametri presentasse contemporaneamente il valore più vicino possibile al fisiologico, e quindi il momento in cui presumibilmente l'efficacia della tossina fosse al suo massimo, si è visto come per la maggior parte dei pazienti l'efficacia della tossina sull'arto patologico sia massima a distanza di 30 giorni dall'iniezione. Nel caso dell'arto sano invece, per tre pazienti la situazione migliore si è verificata a 30 giorni dall'iniezione, per due a 60 e per uno a 90.

Ulteriori studi con una popolazione più ampia di soggetti a disposizione potrebbero identificare se vi siano parametri che risentono maggiormente dell'effetto della tossina,

confermare il risultato per l'arto patologico ed eventualmente stabilire un numero di giorni più preciso per l'efficacia massima della tossina sull'arto sano.

Per i parametri spazio temporali invece, sebbene anch'essi siano migliorati avvicinandosi ai rispettivi valori fisiologici, non è stato possibile stabilire quale di essi risenta di un più marcato miglioramento per effetto della tossina. Il gruppo di pazienti analizzati ha mostrato l'avvicinamento del maggior numero di parametri ai rispettivi valori fisiologici in corrispondenza di una visita diversa e questo non consente di stabilire una distanza dall'iniezione univoca alla quale i pazienti risentano maggiormente dell'effetto della tossina. Anche questo risultato potrebbe essere affinato, giungendo ad un valore di distanza temporale dall'iniezione più preciso, con un maggior numero di soggetti a disposizione.

Infine, non si sono trovate somiglianze apprezzabili tra gli andamenti dei parametri spazio temporali e quelli dei parametri cinematici, tuttavia: per due pazienti si è trovata una correlazione tra la visita alla quale si è registrata la situazione migliore dal punto di vista dei parametri cinematici sul piano sagittale (per l'arto patologico) e la visita alla quale si è visto lo stesso ma per i parametri spazio temporali (globali e per l'arto patologico), mentre per un solo paziente si è trovata una correlazione tra la visita alla quale si è registrata la situazione migliore dal punto di vista dei parametri cinematici sul piano trasversale (per l'arto patologico) e la visita alla quale si è visto lo stesso ma per i parametri spazio temporali (globali e per l'arto patologico).

Studi futuri, con una popolazione di soggetti maggiore, potrebbero confermare queste correlazioni ed eventualmente trovare delle somiglianze apprezzabili tra l'evoluzione dei parametri cinematici e quella dei parametri spazio temporali a seguito dell'iniezione di tossina botulinica.

Indice delle figure

Figura 1 Ossa del complesso gamba-caviglia-piede [a]	10
Figura 2 Suddivisione in zone delle ossa del piede [b]	10
Figura 3 Archi formati dalle ossa del piede.....	11
Figura 4. Vista laterale dei legamenti del complesso gamba-caviglia-piede [c].....	11
Figura 5. Vista mediale dei legamenti del complesso gamba-piede-caviglia [c]	12
Figura 6. Vista plantare dei legamenti del piede [c].....	12
Figura 7. Vista posteriore dei legamenti del complesso gamba-caviglia-piede [c].....	13
Figura 8. Struttura di una diartrosi [d].....	14
Figura 9. Trocleoartrosi	14
Figura 10. Trocoide	14
Figura 11. Articolazione a sella.....	14
Figura 12. Condiloartrosi.....	14
Figura 13. Enartrosi	14
Figura 14. Artrodia [e].....	14
Figura 15. Articolazioni del complesso caviglia-piede [b].....	16
Figura 16. Struttura di un sarcomero (Neumann, 2013).....	17
Figura 17. Struttura del muscolo scheletrico (Neumann, 2013).....	18
Figura 18. Esempi di muscoli estrinseci.....	20
Figura 19. Esempi di muscoli estrinseci.....	20
Figura 20. Esempi di muscoli estrinseci.....	21
Figura 21. Esempi di muscoli estrinseci.....	21
Figura 22. Esempi di muscoli estrinseci.....	22
Figura 23. Movimento di dorsiflessione e plantiflessione (Neumann, 2013)	23
Figura 24. Movimento di eversione e inversione (Neumann, 2013).....	23
Figura 25. Sistema nervoso centrale.....	26
Figura 26. Struttura del motoneurone (Northrop, 2000)	26
Figura 27. Percorso del segnale dalla corteccia cerebrale fino al muscolo [g].	27
Figura 28. Circolazione anteriore	28
Figura 29. Circolazione Posteriore	28
Figura 30. Piede equino e piede varo [h].....	31
Figura 31. Partendo da sinistra: rotazione del calcagno, equinismo di calcagno ed astragalo e rotazione dell'asse del collo dell'astragalo [h].....	32
Figura 32. Adduzione, equinismo e supinazione dell'avampiede [h].	32

Figura 33. Spostamento innaturale della tibia (cerchiata in rosso) e ginocchio iper-esteso (cerchiato in verde) (Neumann, 2013).....	33
Figura 34. Foot drop (cerchiato in rosso) e iper-flessione di anca e ginocchio (cerchiati in verde) (Neumann, 2013).....	33
Figura 35. Struttura di una sinapsi [i].	34
Figura 36. Azione della tossina botulinica [j].	35
Figura 37. Andamento dell'efficacia della tossina botulinica tra una iniezione e la successiva (Jacinto et al., 2020).....	35
Figura 38. Fasi di appoggio e pendolamento per piede destro e sinistro durante un ciclo del passo e fasi di singolo e doppio supporto.	38
Figura 39. Sotto-fasi del ciclo del passo.	39
Figura 40. Angoli di rotazione delle pelvi (Neumann, 2013).	40
Figura 41. Angoli di rotazione dell'anca.	41
Figura 42. Angoli di rotazione del ginocchio.	41
Figura 43. Angoli di rotazione della caviglia.	41
Figura 44. Andamenti fisiologici degli angoli di pelvi, coscia, ginocchio e caviglia durante il ciclo del passo (Neumann, 2013)	42
Figura 45. Tempistiche di attivazione fisiologiche dei muscoli durante il ciclo del passo (Neumann, 2013).....	43
Figura 46. Alcuni dei muscoli con attivazione importante durante il ciclo del passo....	44
Figura 47. Alcuni dei muscoli con attivazione importante durante il ciclo del passo....	44
Figura 48. Alcuni dei muscoli con attivazione importante durante il ciclo del passo....	44
Figura 49. Alcuni dei muscoli con attivazione importante durante il ciclo del passo....	45
Figura 50. Esempi di parametri spazio-temporali	46
Figura 51. Esempio di markers passivi (a sinistra) ed esempio di markers attivi (a destra).	47
Figura 52. Esempio di modello a segmenti rigidi [k].....	48
Figura 53. Misure antropometriche	48
Figura 54. Terna locale definita in base a tre marker per il segmento del piede.	49
Figura 55. Esempio di posizionamento di alcuni markers.....	49
Figura 56. Terne posizionate nei baricentri dei singoli segmenti.....	50
Figura 57. Esempio di acquisizione della reazione vincolare piede-terreno nel piano sagittale.....	51
Figura 58. Esempio di pedana estensimetrica	52
Figura 59. Esempio di pedana piezoelettrica.....	52
Figura 60. Active Wand.....	54

Figura 61. Posizionamento dell'Active Wand per la calibrazione statica.....	54
Figura 62. Effetto grafico delle operazioni eseguite.....	55
Figura 63. A sinistra un esempio di parametri spazio-temporali, a destra un esempio di cinematica [1].....	57
Figura 64. Esempio di dinamica calcolata dal software Nexus [1].....	57
Figura 65. Cinematica articolare della caviglia per cinque pazienti sui tre piani anatomici, in grigio scuro gli andamenti patologici ed in grigio chiaro gli andamenti fisiologici (Benedetti et al., 2011)	61
Figura 66. Evoluzione di alcuni parametri spazio temporali a seguito dell'iniezione di tossina botulinica. SLS: singolo supporto per l'arto patologico, DS: doppio supporto per l'arto patologico, Ws: velocità globale del cammino, Str: tempo del passo globale. T0, t1, t2, t3 e t4 corrispondono rispettivamente a: pre iniezione e 30,60,90 e 120 giorni dall'iniezione. (Gastaldi et al., 2015)	63
Figura 67. Confronto tra l'attività del soleo pre iniezione (linea tratteggiata) e post iniezione (linea continua) di tossina botulinica (Hesse et al., 1996).....	64
Figura 68. Le componenti della reazione piede terreno, con F_y è indicata la componente anteroposteriore (Bensoussan et al., 2006).....	66
Figura 69. Sottofasi in cui è stato diviso il tempo che intercorre tra il momento in cui il paziente si trova ancora in doppio supporto ed il contatto iniziale del calcagno (Bensoussan et al., 2006).....	66
Figura 70. Andamento della componente antero-posteriore della reazione piede-terreno per arto patologico, durante le tre sottofasi che precedono il contatto iniziale (Bensoussan et al., 2006).	68
Figura 71. Andamento della componente antero-posteriore della reazione piede-terreno per arto sano, durante le tre sottofasi che precedono il contatto iniziale (Bensoussan et al., 2006).....	68
Figura 72. Movimenti della caviglia nei tre piani (Neumann, 2013)	72
Figura 73. Cinematica articolare di anca, ginocchio e caviglia nel piano sagittale per entrambi gli arti di M01, prima dell'iniezione di tossina botulinica.	74
Figura 74. Cinematica articolare di anca, ginocchio e caviglia nel piano sagittale per entrambi gli arti di M02, prima dell'iniezione di tossina botulinica.	75
Figura 75. Cinematica articolare di anca, ginocchio e caviglia nel piano sagittale per entrambi gli arti di M03, prima dell'iniezione di tossina botulinica.	76
Figura 76. Cinematica articolare di anca, ginocchio e caviglia nel piano sagittale per entrambi gli arti di M04, prima dell'iniezione di tossina botulinica.	77

Figura 77. Cinematica articolare di anca, ginocchio e caviglia nel piano sagittale per entrambi gli arti di M05, prima dell'iniezione di tossina botulinica.	78
Figura 78. Cinematica articolare di anca, ginocchio e caviglia nel piano sagittale per entrambi gli arti di F01, prima dell'iniezione di tossina botulinica.	79
Figura 79: Punti significativi delle curve cinematiche di anca e ginocchio	80
Figura 80 Punti significativi della curva cinematica della caviglia.....	80
Figura 81. Escursioni tra i punti significativi delle curve cinematiche di anca e ginocchio.	85
Figura 82 Escursioni tra i punti significativi delle curve cinematiche della caviglia....	86
Figura 83. Cinematica articolare della caviglia nel piano frontale per entrambi gli arti di M01, prima dell'iniezione di tossina botulinica	91
Figura 84. Cinematica articolare della caviglia nel piano frontale per entrambi gli arti di M02, prima dell'iniezione di tossina botulinica	91
Figura 85. Cinematica articolare della caviglia nel piano frontale per entrambi gli arti di M03, prima dell'iniezione di tossina botulinica	92
Figura 86. Cinematica articolare della caviglia nel piano frontale per entrambi gli arti di M04, prima dell'iniezione di tossina botulinica	92
Figura 87. Cinematica articolare della caviglia nel piano frontale per entrambi gli arti di M05, prima dell'iniezione di tossina botulinica	93
Figura 88. Cinematica articolare della caviglia nel piano frontale per entrambi gli arti di F01, prima dell'iniezione di tossina botulinica	93
Figura 89. Cinematica articolare della caviglia nel piano trasversale per entrambi gli arti di M01, prima dell'iniezione di tossina botulinica	94
Figura 90. Cinematica articolare della caviglia nel piano trasversale per entrambi gli arti di M02, prima dell'iniezione di tossina botulinica	94
Figura 91 Cinematica articolare della caviglia nel piano trasversale per entrambi gli arti di M03 prima dell'iniezione di tossina botulinica	95
Figura 92. Cinematica articolare della caviglia nel piano trasversale per entrambi gli arti di M04 prima dell'iniezione di tossina botulinica	95
Figura 93. Cinematica articolare della caviglia nel piano trasversale per entrambi gli arti di M05 prima dell'iniezione di tossina botulinica	96
Figura 94. Cinematica articolare della caviglia nel piano trasversale per entrambi gli arti di F01 prima dell'iniezione di tossina botulinica	96
Figura 95. Angoli di flesso estensione di anca per entrambi gli arti di M01, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	102

Figura 96 Angoli di flesso estensione di anca per entrambi gli arti di M02, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	103
Figura 97 Angoli di flesso estensione di anca per entrambi gli arti di M03, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	104
Figura 98 Angoli di flesso estensione di anca per entrambi gli arti di M04, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	105
Figura 99 Angoli di flesso estensione di anca per entrambi gli arti di M05, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	106
Figura 100 Angoli di flesso estensione di anca per entrambi gli arti di F01, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	107
Figura 101 Valori assunti dai punti significativi della curva cinematica di anca. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia è il valore fisiologico del picco.	108
Figura 102 Valori assunti dai punti significativi della curva cinematica di anca. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia è il valore fisiologico del picco.	109
Figura 103. Misura di ROM articolare, estensione in fase di appoggio e flessione in fase di pendolamento alle varie visite, per anca sana ed anca patologica di M01, M02 ed M03. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia rappresenta il valore fisiologico.	113
Figura 104. Misura di ROM articolare, estensione in fase di appoggio e flessione in fase di pendolamento alle varie visite, per anca sana ed anca patologica di M03, M04 ed M05. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia rappresenta il valore fisiologico.	114
Figura 105. Andamento del ROM medio calcolato ad ogni visita per anca sana e anca patologica. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia rappresenta il valore fisiologico.	115

Figura 106 Angoli di flesso estensione di ginocchio per entrambi gli arti di M01, prima dell'iniezione di tossina botulinica (Visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (Visite 1-4).	117
Figura 107 Angoli di flesso estensione di ginocchio per entrambi gli arti di M02, prima dell'iniezione di tossina botulinica (Visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (Visite 1-4).	118
Figura 108. Angoli di flesso estensione di ginocchio per entrambi gli arti di M03, prima dell'iniezione di tossina botulinica (Visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (Visite 1-4).	119
Figura 109. Angoli di flesso estensione di ginocchio per entrambi gli arti di M04, prima dell'iniezione di tossina botulinica (Visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (Visite 1-4).	120
Figura 110. Angoli di flesso estensione di ginocchio per entrambi gli arti di M05, prima dell'iniezione di tossina botulinica (Visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (Visite 1-4).	121
Figura 111. Angoli di flesso estensione di ginocchio per entrambi gli arti di F01, prima dell'iniezione di tossina botulinica (Visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (Visite 1-4).	122
Figura 112 Valore dei punti significativi per la cinematica del ginocchio. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per Visita 0, blu per Visita 1, verde per Visita 2, Viola per Visita 3 e giallo per Visita 4. La barra grigia è il valore fisiologico del picco.....	123
Figura 113 Valore dei punti significativi per la cinematica del ginocchio. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per Visita 0, blu per Visita 1, verde per Visita 2, Viola per Visita 3 e giallo per Visita 4. La barra grigia è il valore fisiologico del picco.....	124
Figura 114. Misura di ROM articolare, estensione in fase di appoggio e flessione ed estensione in fase di pendolamento alle varie visite, per ginocchio sano e ginocchio patologico di M01, M02 ed M03. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per Visita 0, blu per Visita 1, verde per Visita 2, Viola per Visita 3 e giallo per Visita 4. La barra grigia rappresenta il valore fisiologico	129
Figura 115. Misura di ROM articolare, estensione in fase di appoggio e flessione ed estensione in fase di pendolamento alle varie visite, per ginocchio sano e ginocchio patologico di M04, M05 ed F01. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per Visita 0, blu per Visita 1, verde per Visita 2, Viola per Visita 3 e giallo per Visita 4. La barra grigia rappresenta il valore fisiologico.	130
Figura 116. Andamento del ROM medio calcolato ad ogni visita per ginocchio sano e ginocchio patologico. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per	

visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia rappresenta il valore fisiologico.	131
Figura 117. Angoli di dorsi-plantiflessione di caviglia per entrambi gli arti di M01, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	134
Figura 118. Angoli di dorsi-plantiflessione di caviglia per entrambi gli arti di M02, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	135
Figura 119. Angoli di dorsi-plantiflessione di caviglia per entrambi gli arti di M03, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	136
Figura 120. Angoli di dorsi-plantiflessione di caviglia per entrambi gli arti di M04, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	137
Figura 121. Angoli di dorsi-plantiflessione di caviglia per entrambi gli arti di M05, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	138
Figura 122. Angoli di dorsi-plantiflessione di caviglia per entrambi gli arti di F01, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	139
Figura 123. Valore dei punti significativi per la cinematica della caviglia. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia è il valore fisiologico del picco.	140
Figura 124. Valore dei punti significativi per la cinematica della caviglia. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia è il valore fisiologico del picco.	141
Figura 125. Misura di ROM articolare, dorsiflessione in fase di appoggio e plantiflessione e dorsiflessione in fase di pendolamento alle varie visite, per caviglia sana e caviglia patologica di M01, M02 ed M03. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia rappresenta il valore fisiologico	144
Figura 126. Misura di ROM articolare, dorsiflessione in fase di appoggio e plantiflessione e dorsiflessione in fase di pendolamento alle varie visite, per caviglia sana e caviglia patologica di M04, M05 ed F01. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia rappresenta il valore fisiologico.	145

Figura 127. Andamento ROM medio calcolato ad ogni visita per caviglia sana e caviglia patologica. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia rappresenta il valore fisiologico.	147
Figura 128. Angoli di inv/eversione di caviglia per entrambi gli arti di M01, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	150
Figura 129. Angoli di inv/eversione di caviglia per entrambi gli arti di M02, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	151
Figura 130. Angoli di inv/eversione di caviglia per entrambi gli arti di M03, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	152
Figura 131. Angoli di inv/eversione di caviglia per entrambi gli arti di M04, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	153
Figura 132. Angoli di inv/eversione di caviglia per entrambi gli arti di M05, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	154
Figura 133. Angoli di inv/eversione di caviglia per entrambi gli arti di F01, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	155
Figura 134. Misura del ROM articolare sul piano frontale alle varie visite, per caviglia sana e caviglia patologica di M01, M02, M03 ed M04. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4.	156
Figura 135. Misura del ROM articolare sul piano frontale alle varie visite, per caviglia sana e caviglia patologica di M05 ed F01. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4.....	157
Figura 136. Angoli di foot progress per entrambi gli arti di M01, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	158
Figura 137. Angoli di foot progress per entrambi gli arti di M02, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	159
Figura 138. Angoli di foot progress per entrambi gli arti di M03, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	160

Figura 139. Angoli di foot progress per entrambi gli arti di M04, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	161
Figura 140. Angoli di foot progress per entrambi gli arti di M05, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	162
Figura 141. Angoli di foot progress per entrambi gli arti di F01, prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	163
Figura 142. Misura del ROM articolare sul piano trasversale alle varie visite, per caviglia sana e caviglia patologica di M01, M02, M03 ed M04. Ogni visita corrisponde ad un colore rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4.	164
Figura 143. Misura del ROM articolare sul piano trasversale alle varie visite, per caviglia sana e caviglia patologica di M05 ed F01. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4.....	165
Figura 144. Andamento del ROM medio (sul piano trasversale) calcolato ad ogni visita per caviglia sana e caviglia patologica. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4. La barra grigia rappresenta il valore fisiologico	166
Figura 145. Parametri spazio temporali globali di M01 prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	167
Figura 146 Parametri spazio temporali globali di M02 prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	167
Figura 147. Parametri spazio temporali globali di M03 prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	168
Figura 148 Parametri spazio temporali globali di M04 prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	168
Figura 149. Parametri spazio temporali globali di M05 prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	169
Figura 150. Parametri spazio temporali globali di F01 prima dell'iniezione di tossina botulinica (visita 0) e a distanza di 30,60, 90 e 120 giorni (visite 1-4).	169
Figura 151. Percentuale del ciclo del passo spesa in singolo supporto (Single Leg Support) per i pazienti M01, M02, M03 ed M04 acquisita prima dell'iniezione di tossina botulinica (rosso) e a distanza di 30-60-90 e 120 giorni (rispettivamente blu, verde, viola e giallo).	171
Figura 152. Percentuale del ciclo del passo spesa in singolo supporto (Single Leg Support) per i pazienti M05 ed F01 acquisita prima dell'iniezione di tossina botulinica (rosso) e a distanza di 30-60-90 e 120 giorni (rispettivamente blu, verde, viola e giallo).....	172

Figura 153. Percentuale del ciclo del passo spesa in doppio supporto (Double Leg Support) per i pazienti M01 ed M02 acquisita prima dell'iniezione di tossina botulinica (rosso) e a distanza di 30-60-90 e 120 giorni (rispettivamente blu, verde, viola e giallo).	172
Figura 154. Percentuale del ciclo del passo spesa in doppio supporto (Double Leg Support) per i pazienti M03, M04, M05 ed F01 acquisita prima dell'iniezione di tossina botulinica (rosso) e a distanza di 30-60-90 e 120 giorni (rispettivamente blu, verde, viola e giallo).	173
Figura 155. Limp index per i pazienti M01, M02, M03 ed M04 acquisito prima dell'iniezione di tossina botulinica (rosso) e a distanza di 30-60-90 e 120 giorni (rispettivamente blu, verde, viola e giallo).	174
Figura 156. Limp index per i pazienti M05 ed F01 acquisito prima dell'iniezione di tossina botulinica (rosso) e a distanza di 30-60-90 e 120 giorni (rispettivamente blu, verde, viola e giallo).	175

Indice delle tabelle

Tabella 1 Valutazioni cliniche più comuni per pazienti affetti da spasticità post ictus. (Alingh et al., 2020; Hara et al., 2019; Datta Gupta et al., 2019; Gupta et al., 2018; Cofré Lizama et al., 2019).....	30
Tabella 2 Evoluzione dei valori assunti da alcuni punti significativi delle curve cinematiche di ginocchio e caviglia a seguito dell'iniezione di tossina botulinica riportati come media \pm deviazione standard (Bollens et al., 2013).....	59
Tabella 3 Valori di alcuni punti significativi della cinematica articolare della caviglia per pazienti con piede equinovaro e per soggetti sani (Benedetti et al., 2011).....	62
Tabella 4 Valore medio e deviazione standard di alcuni parametri spazio temporali globali acquisiti per soggetti sani e per pazienti con piede equinovaro post ictus.(Benedetti et al., 2011).....	62
Tabella 5. Dati relativi a 6 dei 20 soggetti studiati da Gastaldi et al., 2015.....	73
Tabella 6 Valori dei punti significativi della cinematica dell'anca patologica riportati come media \pm deviazione standard.....	81
Tabella 7 Valori dei punti significativi della cinematica dell'anca sana riportati come media \pm deviazione standard.....	81
Tabella 8. Valori dei punti significativi della cinematica del ginocchio patologico riportati come media \pm deviazione standard.....	82
Tabella 9 Valori dei punti significativi della cinematica del ginocchio sano riportati come media \pm deviazione standard.	83
Tabella 10 Valori dei punti significativi della cinematica della caviglia patologica riportati come media \pm deviazione standard.....	84
Tabella 11 Valori dei punti significativi della cinematica della caviglia sana riportati come media \pm deviazione standard.	85
Tabella 12. Escursioni tra i picchi significativi della cinematica dell'anca patologica riportate come media \pm deviazione standard.	86
Tabella 13. Escursioni tra i picchi significativi della cinematica dell'anca sana riportate come media \pm deviazione standard.....	87
Tabella 14 Escursioni tra i picchi significativi (per la sola fase di pendolamento) della cinematica del ginocchio patologico riportate come media \pm deviazione standard.	88
Tabella 15. Escursioni tra i picchi significativi della cinematica del ginocchio sano riportati come media \pm deviazione standard.....	88

Tabella 16. Escursioni tra i picchi significativi della cinematica della caviglia patologica riportati come media \pm deviazione standard.....	89
Tabella 17 Escursioni tra i picchi significativi della cinematica della caviglia sana riportati come media \pm deviazione standard.....	89
Tabella 18. ROM di anca, ginocchio e caviglia nel piano sagittale riferiti all'arto patologico riportati come media \pm deviazione standard.....	90
Tabella 19. ROM di anca, ginocchio e caviglia nel piano sagittale riferiti all'arto sano riportati come media \pm deviazione standard.....	90
Tabella 20 ROM della caviglia patologica e della caviglia sana nel piano frontale riportati come media \pm deviazione standard.....	97
Tabella 21 ROM della caviglia patologica e della caviglia sana nel piano trasversale e ROM fisiologico riportati come media \pm deviazione standard.....	97
Tabella 22. Parametri spazio-temporali globali (media \pm deviazione standard) acquisiti per i sei pazienti durante la visita 0	98
Tabella 23. Parametri spazio-temporali (media \pm deviazione standard) per il solo arto patologico dei sei pazienti acquisiti alla visita 0. GC: Gait cycle (ciclo del passo).	98
Tabella 24 Parametri spazio-temporali (media \pm deviazione standard) per il solo arto sano dei sei pazienti acquisiti alla visita 0. GC: Gait cycle (ciclo del passo).	99
Tabella 25. Evidenziazione delle visite alle quali i parametri cinematici (sul piano sagittale) per l'arto patologico si avvicinano di più ai rispettivi valori fisiologici. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4.....	179
Tabella 26. Evidenziazione delle visite alle quali i parametri cinematici (sul piano sagittale) per l'arto sano si avvicinano di più ai rispettivi valori fisiologici. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4.....	180
Tabella 27. Evidenziazione delle visite alle quali il ROM della caviglia sul piano trasversale si avvicina di più al valore fisiologico. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4.	181
Tabella 28. Evidenziazione delle visite alle quali i parametri spazio-temporali si avvicinano di più ai rispettivi valori fisiologici. Ogni visita corrisponde ad un colore: rosso per visita 0, blu per visita 1, verde per visita 2, viola per visita 3 e giallo per visita 4.	182

Bibliografia

- Aktürk, S., Büyükavcı, R. and Ersoy, Y.: Functional outcomes following ultrasound-guided botulinum toxin type A injections to reduce spastic equinovarus in adult post-stroke patients, *Toxicon*, 146, 95–98, doi:10.1016/j.toxicon.2018.03.003, 2018.
- Alingh, J. F., Groen, B. E., Van Asseldonk, E. H. F., Geurts, A. C. H. and Weerdesteyn, V.: Effectiveness of rehabilitation interventions to improve paretic propulsion in individuals with stroke – A systematic review, *Clin. Biomech.*, 71(June 2019), 176–188, doi:10.1016/j.clinbiomech.2019.10.021, 2020.
- Benamer, H. T.: *Essential Revision Notes in Clinical Neurology*, 1st ed., CRC Press., 2011.
- Benedetti, M. G., Manca, M., Ferraresi, G., Boschi, M. and Leardini, A.: A new protocol for 3D assessment of foot during gait: Application on patients with equinovarus foot, *Clin. Biomech.*, 26(10), 1033–1038, doi:10.1016/j.clinbiomech.2011.06.002, 2011.
- Bensoussan, L., Mesure, S., Viton, J. M. and Delarque, A.: Kinematic and kinetic asymmetries in hemiplegic patients' gait initiation patterns, *J. Rehabil. Med.*, 38(5), 287–294, doi:10.1080/16501970600694859, 2006.
- Bollens, B., Gustin, T., Stoquart, G., Detrembleur, C., Lejeune, T. and Deltombe, T.: A randomized controlled trial of selective neurotomy versus botulinum toxin for spastic equinovarus foot after stroke, *Neurorehabil. Neural Repair*, 27(8), 695–703, doi:10.1177/1545968313491002, 2013.
- Campanini, I., Cosma, M., Manca, M. and Merlo, A.: Added Value of Dynamic EMG in the Assessment of the Equinus and the Equinovarus Foot Deviation in Stroke Patients and Barriers Limiting Its Usage, *Front. Neurol.*, 11(November), 1–8, doi:10.3389/fneur.2020.583399, 2020.
- Cofré Lizama, L. E., Khan, F. and Galea, M. P.: Beyond speed: Gait changes after botulinum toxin injections in chronic stroke survivors (a systematic review), *Gait Posture*, 70(September 2018), 389–396, doi:10.1016/j.gaitpost.2019.03.035, 2019.
- Datta Gupta, A., Visvanathan, R., Cameron, I., Koblar, S. A., Howell, S. and Wilson, D.: Efficacy of botulinum toxin in modifying spasticity to improve walking and quality of life in post-stroke lower limb spasticity - A randomized double-blind placebo controlled study, *BMC Neurol.*, 19(1), 1–7, doi:10.1186/s12883-019-1325-3, 2019.
- Deltombe, T., Wautier, D., De Cloedt, P., Fostier, M. and Gustin, T.: Assessment and treatment of spastic equinovarus foot after stroke: Guidance from the mont-godinne interdisciplinary group, *J. Rehabil. Med.*, 49(6), 461–468, doi:10.2340/16501977-2226,

2017.

Feigin, V. L., Lawes, C. M. M., Bennett, D. A. and Anderson, C. S.: Stroke epidemiology: a review of population-based studies of incidence, prevalence, and case-fatality in the late 20th century, *Lancet Neurol.*, 2(1), 43–53, doi:10.1016/S1474-4422(03)00266-7, 2003.

Gastaldi, L., Lisco, G., Pastorelli, S. and Dimanico, U.: Effects of botulinum neurotoxin on spatio-temporal gait parameters of patients with chronic stroke: A prospective open-label study, *Eur. J. Phys. Rehabil. Med.*, 51(5), 609–618, 2015.

Gupta, A. D., Chu, W. H., Howell, S., Chakraborty, S., Koblar, S., Visvanathan, R., Cameron, I. and Wilson, D.: A systematic review: efficacy of botulinum toxin in walking and quality of life in post-stroke lower limb spasticity, *Syst. Rev.*, 7(1), 1, doi:10.1186/s13643-017-0670-9, 2018.

Hara, T., Momosaki, R., Niimi, M., Yamada, N., Hara, H. and Abo, M.: Botulinum toxin therapy combined with rehabilitation for stroke: A systematic review of effect on motor function, *Toxins (Basel)*, 11(12), doi:10.3390/toxins11120707, 2019.

Hesse, S., Krajnik, J., Luecke, D., Jahnke, M. T., Gregoric, M. and Mauritz, K. H.: Ankle muscle activity before and after botulinum toxin therapy for lower limb extensor spasticity in chronic hemiparetic patients, *Stroke*, 27(3), 455–460, doi:10.1161/01.STR.27.3.455, 1996.

Jacinto, J., Varriale, P., Pain, E., Lysandropoulos, A. and Esquenazi, A.: Patient Perspectives on the Therapeutic Profile of Botulinum Neurotoxin Type A in Spasticity, *Front. Neurol.*, 11, 1–17, doi:10.3389/fneur.2020.00388, 2020.

Li, S.: Ankle and foot spasticity patterns in chronic stroke survivors with abnormal gait, *Toxins (Basel)*, 12(10), doi:10.3390/toxins12100646, 2020.

Micieli, G. and Amantea, D.: Rational Basis for Clinical Translation in Stroke Therapy, Baton Rouge: CRC Press, Baton Rouge., 2015.

Neumann, D. A.: Kinesiology of the musculoskeletal system-e-book: foundations for rehabilitation, Elsevier Health Sciences., 2013.

Northrop, R. B.: Introduction to dynamic modeling of neuro-sensory systems, CRC Press., 2000.

Nowak, D. A. and Hermsdörfer, J.: Sensorimotor control of grasping: physiology and pathophysiology, Cambridge University Press., 2009.

Redmond, A. C.: The ankle and foot, *Rheumatol.* Sixth Ed., 1–2, 647–655, doi:10.1016/B978-0-323-09138-1.00078-4, 2015.

Tang, S. F., Hong, J. P., McKay, W. B., Tang, C. W., Wu, P. H. and Chu, N. K.: Modification of altered ankle motor control after stroke using focal application of Botulinum toxin type A, *Clin. Neurol. Neurosurg.*, 114(5), 498–501,

doi:10.1016/j.clineuro.2012.03.014, 2012.

Siti internet

- a. <https://focusedcollection.com/it/160287982/stock-photo-human-foot-bones-structural-anatomy.htm>
- b. <https://www.kineticsportcenter.com/blog/index.php?dolore-al-piede--capiamo-insieme-perche--e-come-risolvere>
- c. https://it.wikipedia.org/wiki/Articolazioni_del_piede#Legamenti_delle_articolazioni_della_caviglia_e_del_tarso
- d. https://people.unica.it/pau/files/2016/11/6-articolazioni-ginocchio_RIDOTTA-Compatibility-Mode.pdf
- e. <https://quizlet.com/411724899/flashcards>
- f. https://www.treccani.it/enciclopedia/neurone_res-f6daa336-9b53-11e1-9b2f-d5ce3506d72e_%28Dizionario-di-Medicina%29/
- g. <http://www.superagatoide.altervista.org/motoneuroni.html>
- h. <http://www.fisiokinesiterapia.biz/NewDownload/Malformazioni%20Piedi.pdf>
- i. <https://www.nextme.it/262-folding-proteine>
- j. <https://www.neuropsicomotricista.it/argomenti/41-altro/altro-41/106-la-tossina-botulinica.html>
- k. https://www.youtube.com/watch?v=vT3lfkw_j8&t=157s&ab_channel=Vicon
- l. Acquisizioni provenienti dal database “Nexus sample data” disponibile al seguente link: <https://www.vicon.com/software/models-and-scripts>