

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Scienze Biomediche

Corso di Laurea Triennale in Scienze Motorie

Tesi di Laurea

**CAMBIAMENTI NELL'ARCHITETTURA DEL MUSCOLO
VASTO LATERALE DOPO 4 SETTIMANE DI ALLENAMENTO
TRADIZIONALE O CON SOVRACCARICO ECCENTRICO SU
LEG PRESS**

Relatore: Prof. Martino Franchi

Laureando: Daniel Pagotto

N° di matricola: 1221781

Anno Accademico 2021/2022

INDICE

0 - INTRODUZIONE	4
1- RICHIAMI DI ANATOMIA E FISIOLOGIA MUSCOLARE	7
1.1 <i>Il tessuto muscolare</i>	7
1.2 <i>La struttura macro- e microscopica</i>	9
1.3 <i>Sistema nervoso e muscolo</i>	17
2 - LA CONTRAZIONE MUSCOLARE	23
2.1 <i>Meccanismi molecolari alla base della contrazione</i>	23
2.2 <i>Meccanica muscolare e tipi di contrazione</i>	27
2.3 <i>Relazione tensione-lunghezza</i>	29
2.4 <i>La relazione forza-velocità</i>	31
3 - CENNI SULL'ARCHITETTURA MUSCOLARE	33
3.1 <i>Disposizione delle fibre all'interno del muscolo</i>	33
3.2 <i>Rapporto forma-funzione</i>	35
3.3 <i>Cambiamenti nell'architettura muscolare</i>	36
4 - SCOPO DELLA TESI	39
5 - METODI E MEZZI DELLO STUDIO	40
5.1 <i>Reclutamento</i>	40
5.2 <i>Test effettuati</i>	40
5.3 <i>Study design</i>	44
5.4 <i>Materiali</i>	46
6 - ANALISI DATI E RISULTATI	50
6.1 <i>Spessore muscolare</i>	50
6.2 <i>Angoli di pennazione</i>	53
6.3 <i>Lunghezza dei fascicoli</i>	56
7 - DISCUSSIONE E CONCLUSIONI	59
BIBLIOGRAFIA	61

INTRODUZIONE

Fin dall'inizio della mia carriera universitaria, la ricerca è stata un settore che mi ha fortemente affascinato. Già nel corso dei primi insegnamenti infatti, è nata in me una grande curiosità verso questo ambito grazie ai professori che a lezione ci presentavano numerosi studi scientifici riguardanti le scienze motorie. Questi comprendevano i lavori pionieristici che hanno portato alla scoperta di concetti che oggi rappresentano le fondamenta di questo settore, così come gli articoli più recenti e contemporanei su tematiche che necessitano ancora di ulteriori approfondimenti.

In particolare, durante il secondo anno, il corso di fisiologia tenuto dai professori Marco Narici e Martino Franchi ha suscitato in me molto interesse, al punto che nel secondo semestre decisi di prendere parte come soggetto volontario ad un progetto del loro team di ricerca. Questo gruppo si occupa di fisiologia neuromuscolare presso il Dipartimento di Scienze Biomediche dell'Università di Padova. Brevemente, lo studio consisteva in un breve periodo (10 gg) di scarico dell'arto inferiore destro, seguito poi da 3 settimane di ri-allenamento, valutando gli adattamenti neuromuscolari in risposta ad entrambe le fasi.

Questa esperienza mi ha permesso di vivere in prima persona lo svolgimento di uno studio scientifico, nonché di accrescere la mia passione per questo campo. Per questo motivo, dopo la conclusione, è stato facile capire che avrei voluto condurre una tesi sperimentale proprio in questo ramo della scienza. Così, pochi mesi dopo, ho contattato il professor Franchi che ha accettato di farmi da relatore. Insieme, abbiamo deciso che il suo successivo progetto, riguardante gli adattamenti muscolari conseguenti ad un particolare tipo di allenamento contro resistenza, sarebbe stata un'ottima occasione da cogliere a tal fine.

L'allenamento con i pesi è infatti una delle metodologie più utilizzate per il miglioramento della prestazione fisica, sia in ambito fitness che in quello sportivo. All'interno di questo mondo sta ricevendo sempre più attenzione la fase eccentrica del movimento, poiché qui il muscolo è in grado di sviluppare livelli di forza e tensione meccanica maggiori della concentrica, però con i metodi tradizionali non si riesce a stimolare adeguatamente.

Per questa ragione si è iniziato a ragionare su alcune modalità al fine di sopperire a questa mancanza. Una prima proposta è stata ad esempio l'esecuzione della sola fase eccentrica degli esercizi, ma con un peso superiore al massimo che si riuscirebbe a muovere nell'allenamento convenzionale. Questa modalità è abbastanza limitante e complicata da effettuare, per cui il passo successivo consisteva nel trovare un modo per avere un carico congruo per entrambe le parti del movimento per poter riuscire ad eseguire gli esercizi con continuità, risparmiando tempo e raggiungendo una stimolazione completa. Di conseguenza, la prima soluzione trovata è stata quella di modificare il carico in tempo reale durante le ripetizioni. Anche qui però principali problemi riscontrati sono stati la scarsa gamma di esercizi a cui ciò si può applicare (praticamente solo quelli con bilanciere) e la necessità di avere altre persone che potessero eseguire le operazioni di modifica. Ecco allora che, per risolvere definitivamente questa questione, sono stati progettati dei macchinari simili in tutto e per tutto a quelli convenzionali, tranne che per la fonte della resistenza. Con il classico pacco pesi era infatti praticamente impossibile sovraccaricare durante l'esecuzione del gesto, per cui si è pensato di sostituirlo con un motore elettrico che consentisse la variazione del carico istantaneamente.

È questo il caso del nostro studio, dove, dopo un periodo di allenamento di 4 settimane con un prototipo di questo tipo di macchina, siamo andati a verificare gli effettivi adattamenti del muscolo per comprendere quali differenze vi siano tra la modalità tradizionale e l'utilizzo della sovra stimolazione nella parte eccentrica del movimento. In particolare, in questa tesi verranno esplorati i cambiamenti morfologici nell'architettura muscolare del vasto laterale, in quanto il macchinario utilizzato era una leg press, vota quindi all'allenamento degli arti inferiori.

CAPITOLO 1

RICHIAMI DI ANATOMIA E FISIOLOGIA MUSCOLARE

1.1 IL TESSUTO MUSCOLARE

L'importanza del sistema muscolare si può già evincere partendo dalla considerazione che esso costituisce di norma circa il 50% del peso corporeo nell'uomo, e di poco inferiore nella donna. Ciò che lo rende speciale è la capacità di contrarsi mediante specifiche componenti intracellulari, rappresentando il presupposto fondamentale per una delle funzioni vitali più importanti, ovvero il movimento. Quest'ultimo può essere esterno, quando inteso insieme al sistema scheletrico che comprende le articolazioni, ma anche interno. A partire da questa osservazione è possibile descrivere una prima divisione:

- Muscolo scheletrico = è la tipologia più presente nel corpo umano. Comprende infatti tutti i muscoli che, mediante la trazione esercitata attraverso l'inserzione sulle ossa, ci permettono di muovere il nostro corpo e/o parti di esso nello spazio.
- Muscolo cardiaco = corrisponde alla parte contrattile del cuore ed è dunque imprescindibile per la sopravvivenza.
- Muscolo liscio = si trova nelle pareti degli organi interni cavi e dei vasi, controllandone la motilità e la dimensione del lume.

Queste stesse categorie possono essere classificate in due modi sulla base delle caratteristiche che li accomunano. Se si considera il loro aspetto al microscopio, possiamo avere il tessuto striato, che presenta appunto striature trasversali, a cui appartengono il muscolo scheletrico e il cardiaco, differenziandosi così da quello liscio.

Diversamente, andando ad osservare come viene esercitato il controllo della loro funzione, abbiamo il tessuto muscolare volontario e involontario; controllati rispettivamente dal sistema nervoso somatico e autonomo. Nel primo troviamo i muscoli scheletrici, infatti la loro attivazione dipende principalmente, ma non sempre, dalla nostra volontà. Le eccezioni sono rappresentate dai riflessi, dal controllo del tono posturale e dai movimenti automatizzati (ad es. respirare e camminare). Cardiaco e liscio sono invece sottoposti alla regolazione del sistema nervoso autonomo (SNA) che, come dice il nome stesso, è indipendente dalla presa di decisione con coscienza.

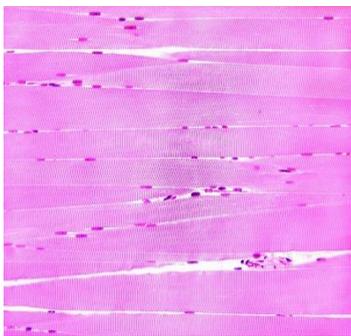


Fig. 1.1: Il tessuto muscolare scheletrico. Tratta dal web: <https://www.medicinapertutti.it/argomento/tessutomuscolare-striato-scheletrico/>

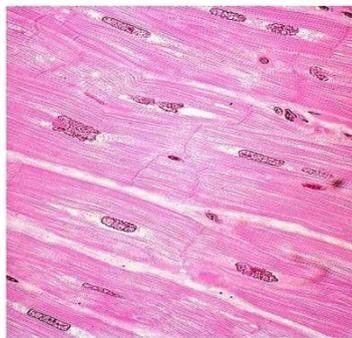


Fig. 1.2: Il tessuto muscolare cardiaco. Tratta dal web: <https://www.medicinapertutti.it/argomento/fibra-muscolare-striata-cardiaca/>

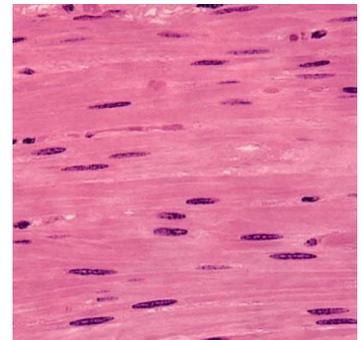


Fig. 1.3: Il tessuto muscolare liscio. Tratta dal web: <https://www.blendspace.com/lessons/dTXpzcjyRH0HbA/sistema-muscolare>

Da questo punto in poi tratterò solamente il muscolo scheletrico, in quanto rappresenta l'elemento centrale dello studio effettuato.

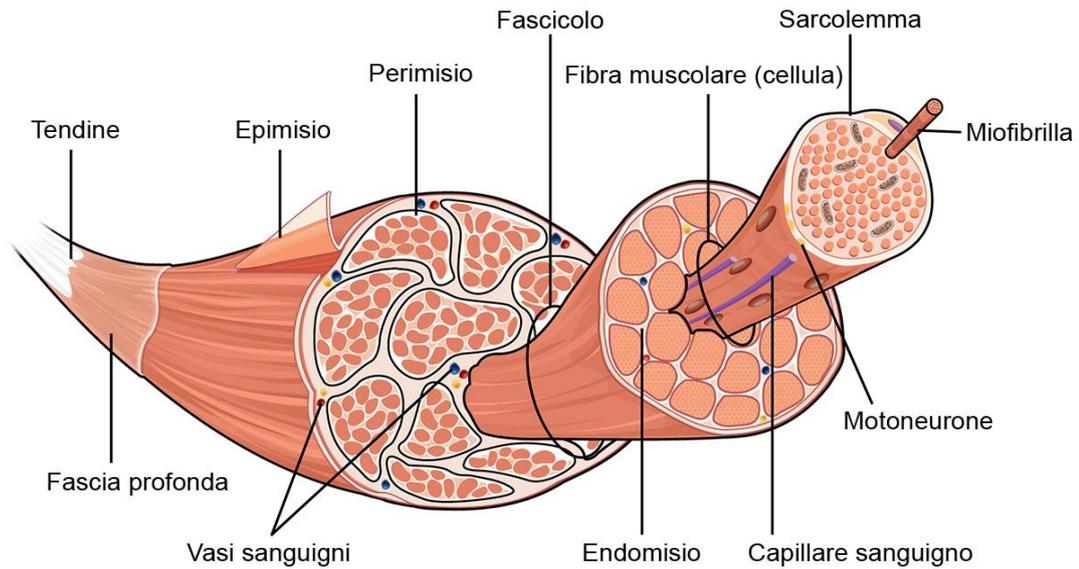
1.2 LA STRUTTURA MACRO- E MICROSCOPICA

Macrostruttura: comune in tutti i muscoli, si compone di tre parti, ovvero ventre muscolare, giunzione miotendinea e tendine vero e proprio. Di solito, ogni muscolo possiede un solo ventre per ogni capo che lo compone, mentre la giunzione e il tendine sono presenti in coppia, una prossimalmente e l'altra distalmente.

La giunzione è formata da cellule ibride, simili a quelle muscolari ma con percentuali sempre maggiori di tessuto connettivo man mano che si va verso le estremità. Essa garantisce una conversione graduale verso il tendine, elemento connettivale rigido fondamentale per la trasmissione di forza alle ossa, permettendo così la produzione di moto.

Osservando una sezione trasversale del tessuto muscolare, si nota che all'interno sono presenti anche altri elementi come nervi, vasi sanguigni e strutture connettivali ricche di collagene. Quest'ultime in particolare sono interessanti, in quanto creano nel muscolo un'organizzazione molto precisa. Più precisamente troviamo:

- Fascia: foglio di tessuto connettivo presente nel corpo in diversi strati. Ha il ruolo di separare, suddividere e sostenere i diversi muscoli vicini tra loro e le altre strutture circostanti.
- Epimisio: guaina fibrosa che circonda l'intero muscolo. È connesso esternamente alla fascia e si proietta verso l'interno dando origine al perimisio.
- Perimisio: invaginazioni connettivali derivanti dall'epimisio che uniscono e avvolgono gruppi di fibre formando così i fascicoli, strutture visibili a occhio nudo che corrispondono alle "venature" della carne.
- Endomisio: sottile guaina di tessuto lasso che circonda ogni fibra, fornendo spazio e ambiente chimico per le terminazioni nervose e capillari



*Fig.1.4: Immagine riassuntiva degli elementi costitutivi della macrostruttura.
 Tratta dal web: <https://open.oregonstate.edu/aandp/chapter/10-2-skeletal-muscle/>*

Osservandoli nella loro interezza, i muscoli possono assumere forme ben distinte, collegate alla funzione che devono svolgere. Nel dettaglio possono essere:

- Fusiformi: spessi al centro e si assottigliano sempre di più andando verso le estremità.
- Paralleli: hanno una larghezza abbastanza uniforme lungo tutto il ventre e i loro fasci decorrono paralleli.
- Triangolari: hanno forma di un ventaglio dove l'apice è il punto in cui tutti i fasci si raccolgono per convergere nell'inserzione.
- Pennati: come si deduce dal nome, sono simili a delle piume poiché le fibre si sviluppano in obliquo fino al tendine che corre lungo il muscolo come un'asta. Possono essere mono-, bi- e multipennati in base ai lati dell'asta su cui sono presenti i fascicoli e al numero di capi muscolari.
- Circolari: detti anche sfinteri, si dispongono intorno ad un foro internamente e ne controllano l'apertura e chiusura

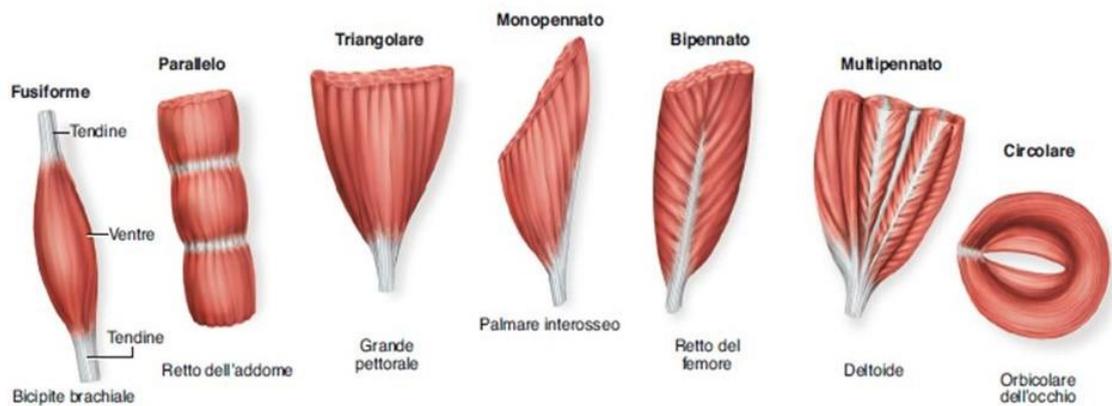
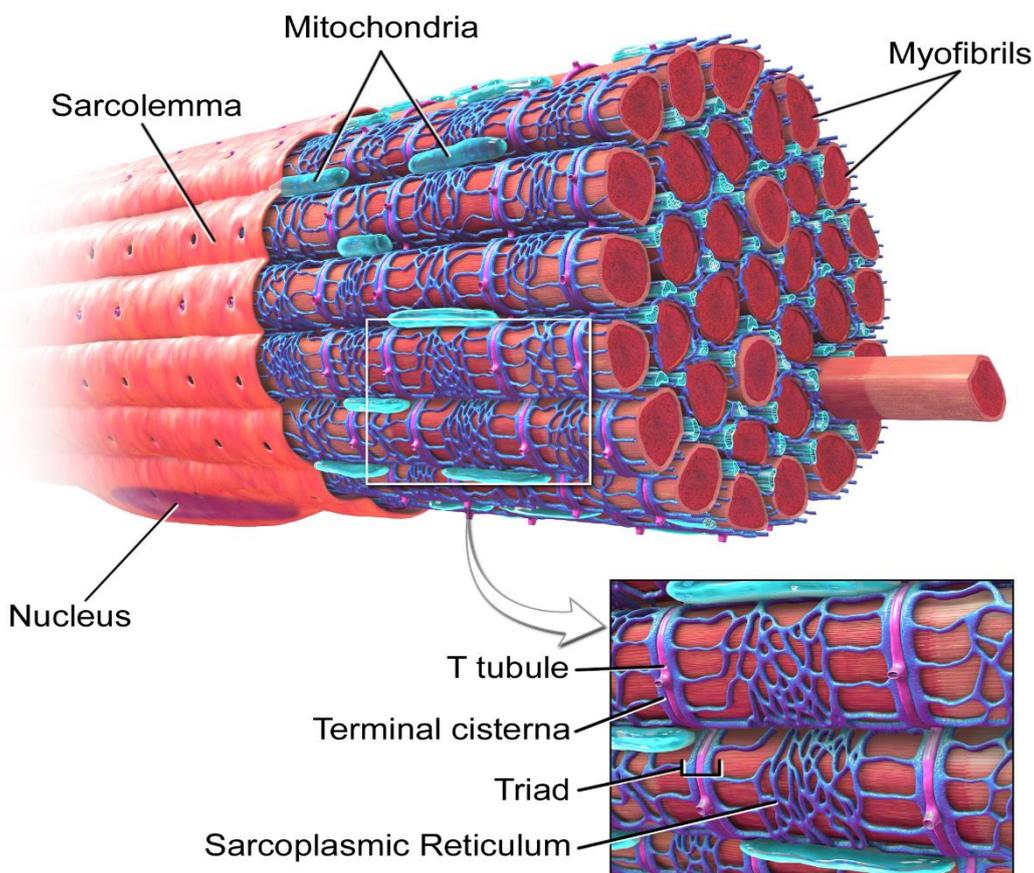


Fig. 1.5: I diversi tipi di muscolo. Immagine tratta dal libro "Anatomia Umana", Saladin K. S. (2012), Piccin.

Microstruttura: come già anticipato, le unità fondamentali sono le fibre muscolari, ovvero cellule polinucleate di forma cilindrica e relativamente grandi (possono estendersi lungo tutta la lunghezza del muscolo). Sono disposte parallelamente e tenute insieme dall'endomisio. La loro membrana plasmatica è detta sarcolemma e svolge tutte le funzioni di una normale membrana, come la separazione tra liquido intra- ed extracellulare e il trasporto selettivo. Di quest'ultimo fanno parte le pompe ioniche, proteine importantissime per la propagazione del potenziale d'azione (PDA), cioè un impulso elettrico fondamentale per la contrazione, come vedremo più avanti. Un'altra particolarità del sarcolemma sono i cosiddetti "tubuli T", sue estensioni che attraversano l'interno della cellula da una parte all'altra permettendo così al segnale elettrico di giungere a tutta la superficie cellulare.

Il citoplasma prende invece il nome di sarcoplasma, costituito per la maggior parte da miofibrille, ovvero lunghi fasci di proteine organizzate in parallelo. Oltre ad esse, contiene soprattutto anche mitocondri, organelli deputati alla produzione di energia; glicogeno, un carboidrato fondamentale per i substrati di quel processo; e mioglobina, una proteina che trasporta ossigeno necessario per l'attività. Vi è poi il reticolo sarcoplasmatico (RS), corrispondente al reticolo endoplasmatico delle altre cellule, che in questo caso forma un reticolo tubulare attorno ad ogni miofibrilla. Lungo questa struttura sono presenti delle dilatazioni sacciformi ad intervalli regolari, denominate "cisterne terminali", delle riserve di ione calcio (Ca^{2+}) collegate a coppie con i tubuli T. Questi tre elementi insieme formano una struttura chiamata triade.



*Fig. 1.6: Rappresentazione di tutti i componenti delle fibra muscolare.
Tratta dal web: <https://it.wikipedia.org/wiki/Sarcolemma>*

Tornando alle miofibrille, ognuna di loro è formata da un insieme di microfilamenti di due tipi, spessi e sottili, disposti parallelamente a linee alterne sul piano trasverso. Guardando le immagini delle miofibrille in serie al microscopio è possibile distinguere una disposizione fortemente organizzata e precisa. Si può notare infatti un'alternanza di zone con un colore verso il bianco ed altre più scure, separate da linee ben marcate. Quelle più chiare sono dette "bande I", mentre le altre "bande A", nomi che stanno per isotropa e anisotropa (riferite all'interazione con la luce polarizzata). Inoltre, al centro della banda A, c'è una zona leggermente diversa denominata "banda H". Al centro di essa si trova la "linea M", un sistema di proteine atto al supporto di tutti i filamenti. Al centro della banda I invece, troviamo la "linea Z" che trasversalmente si presenta come un disco ed è formata da componenti citoscheletrici. L'area compresa tra due dischi Z viene definita sarcomero ed è l'unità funzionale del muscolo, ovvero la minima parte di un tessuto capace di assolvere alla sua funzione. La disposizione appena descritta è il motivo per cui le fibre muscolari assumono l'aspetto striato.

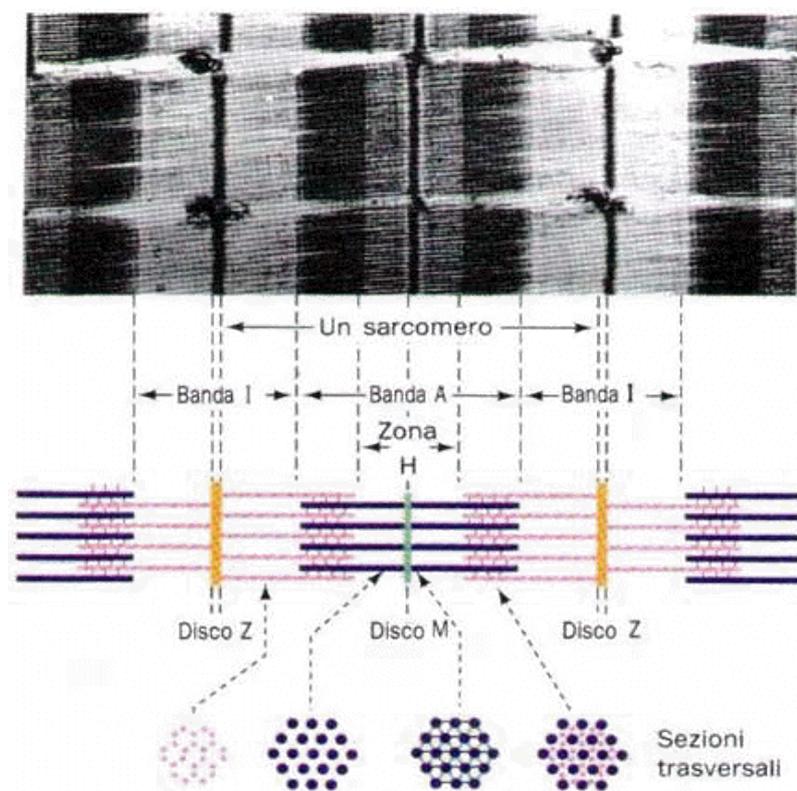


Fig. 1.7: Foto al microscopio e schematizzazione di un sarcomero. Tratta dal web: <https://stefanomosca.it/news/fitness/sviluppo-della-massa-muscolare-e-basi-dellipertrofia/>

Vediamo ora nel dettaglio i miofilamenti, cioè gli effettivi responsabili dell'accorciamento all'interno dei sarcomeri.

- Filamenti spessi: sono composti da diverse centinaia di molecole di miosina, proteina con una forma che ricorda due mazze da golf con i manici intrecciati tra loro (catene leggere) e le teste (catene pesanti globulari) verso l'esterno. Solitamente le due metà di ogni filamento sono speculari, con le teste orientate verso i lati e le code verso il centro. Nel complesso è questa formazione che poi viene vista come banda A, di cui l'area con le sole code è detta anche "zona morta" e corrisponde alla banda H. Sulle teste sono presenti 2 siti di legame fondamentali, uno per legarsi ai filamenti sottili creando i cosiddetti ponti trasversali, mentre l'altro per l'idrolisi dell'adenosintrifosfato (ATP). L'ATP è una molecola ampiamente presente nell'organismo da cui si ricava energia, per questa ragione imprescindibile al fine di realizzare la contrazione. Queste strutture sono stabilizzate grazie alla titina, una grande proteina che forma anch'essa dei filamenti legati alla miosina e ancorati ai dischi Z

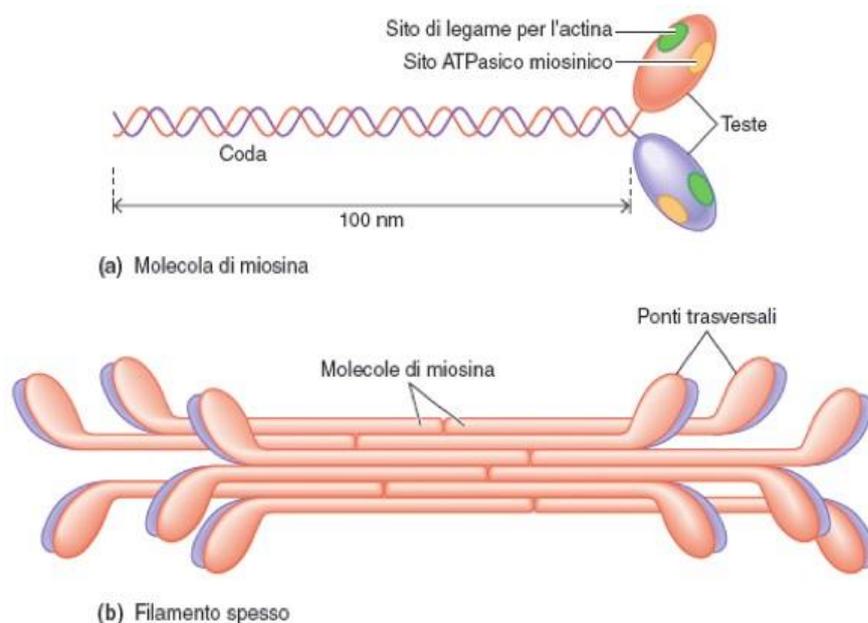


Fig 1.8: Disegno rappresentativo di una singola molecola di miosina intrecciata e di un filamento spesso con le code al centro e le teste verso l'esterno. Immagine tratta dal libro "Fondamenti di fisiologia umana", Sherwood L., Padova, Piccin (2012)

Filamenti sottili: sono coloro che, parallelamente alla titina, creano le bande I chiare dei sarcomeri, ancorandosi ad entrambi i lati dei dischi Z. La loro componente principale è l'actina fibrosa (F-actina), una catena composta da numerose molecole di actina globulare (G-actina), proteina di forma sferica. Qui le catene si avvolgono a coppie formando delle spirali dove ogni singola molecola dispone di un sito di legame per la testa della miosina in modo da formare i già citati ponti trasversali. A completamento di questi filamenti ci sono altre due proteine, chiamate regolatorie in quanto la loro azione è fondamentale per mantenere il muscolo a riposo finché non c'è la necessità di attivazione. La prima è la tropomiosina, un polipeptide filiforme che giace lungo tutto il filamento seguendo il solco della spirale e coprendo i siti per i legami acto-miosinici. L'altra invece è la troponina, un complesso che consta di 3 sub-unità: una che si vincola alla tropomiosina (TnT), la seconda che possiede un sito di legame per lo ione calcio (TnC) e infine la terza che si occupa di legarsi all'actina (TnI), inibendo allo stesso tempo l'interazione di quest'ultima con la miosina. La più importante è sicuramente la TnC poiché quando entra in contatto con il Ca^{2+} produce una modificazione conformazionale del filamento che fa spostare la tropomiosina, esponendo così i siti di legame dell'actina e permettendo la creazione dei ponti.

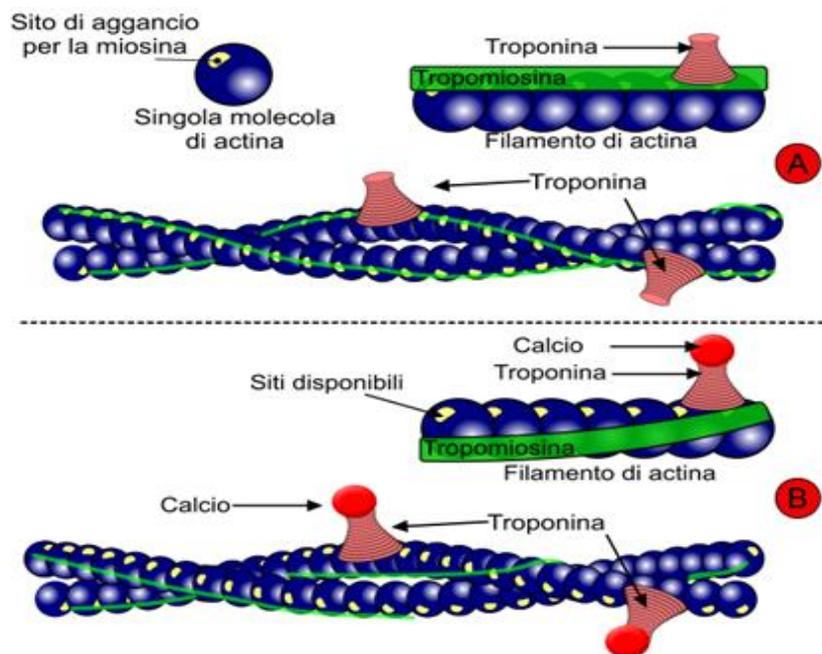


Fig 1.9: Disegno rappresentativo della struttura dei filamenti sottili. Sopra è esposto lo stato di riposo, mentre sotto lo stato attivato dopo il legame con Ca^{2+} . Tratta dal web: <https://biologiawiki.it/wiki/troponina/>

A completamento della complessa organizzazione sarcomeriale si trovano alcune proteine minori, che però hanno comunque un ruolo di rilievo nella stabilizzazione di tutta la struttura. Tra le principali troviamo:

- **Titina:** questa proteina forma anch'essa dei filamenti, denominati elastici per le caratteristiche di questa grande proteina che ha principalmente il ruolo di stabilizzare il filamento spesso e centrare le bande A, come già anticipato. La denominazione deriva dalle sue proprietà meccaniche, si pensa infatti che ad essa sia dovuto il ritorno alla lunghezza originale del sarcomero dopo la contrazione. Inoltre, l'aspetto più interessante ipotizzato successivamente, è che sia coinvolta anche nella produzione di forza passiva quando il tessuto muscolo viene forzato ad allungarsi (Horowitz 1986).
- **Nebulina:** ulteriore filamento intermedio, in questo caso anelastico, che si estende dai dischi Z alle linee M adiacenti legando l'actina. La sua azione riguarda infatti il centramento e la stabilizzazione dei filamenti sottili.
- **Tropomodulina:** questa proteina funge da cappuccio per i filamenti di actina sulla loro estremità centrale, in modo da regolarne la lunghezza impedendo ad altre molecole di legarsi.
- **Distrofina:** è un polipeptide costituente un pezzo imprescindibile dell'impalcatura che ha l'obiettivo di proteggere la membrana cellulare dalle sollecitazioni delle contrazioni. Può subire mutazioni che comportano miopatie denominate distrofie, dove la struttura viene progressivamente compromessa causando indebolimento e disabilità.

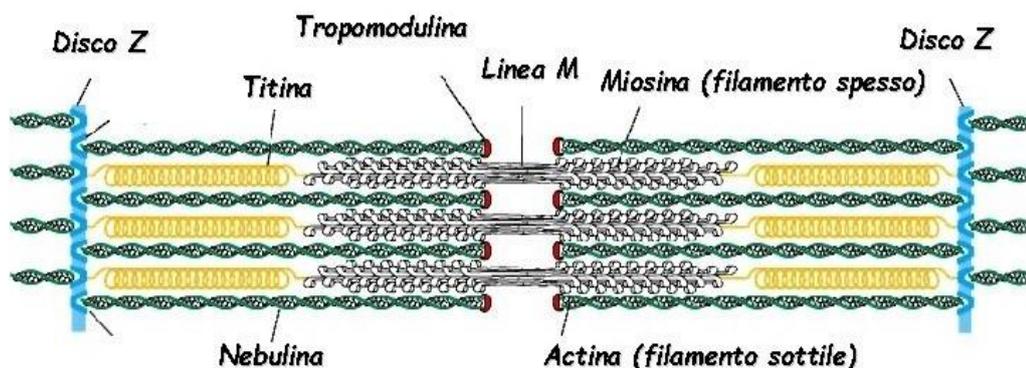


Fig. 1.10: Rappresentazione di un sarcomero con il dettaglio delle proteine minori. Tratta dal web: <https://slidetodoc.com/tessuto-muscolare-tipi-di-muscolo-scheletrico-striato-la/>

1.3 SISTEMA NERVOSO E MUSCOLO

Prima di parlare delle connessioni tra questi due sistemi è necessario fare un'introduzione riguardo i meccanismi alla base della trasmissione del segnale nervoso nell'organismo. Partiamo dal presupposto che ogni cellula possiede una membrana che ne delimita i confini, la cui funzione principale è separare LIC e LEC. Questa separazione crea dei gradienti, ovvero la ricerca spontanea dell'equilibrio dove vi siano differenze di concentrazione di uno o più elementi tra un lato e l'altro della membrana. Essi possono essere di diversa natura, ad esempio quello chimico viene anche chiamato semplicemente gradiente di concentrazione e determina una tendenza delle sostanze a raggiungere pari livello da ambo le parti. Altro gradiente che ci interessa è quello elettrico, dato dal divario tra le cariche positive e negative, rappresentate rispettivamente da ioni positivi e negativi. Relazionando queste due grandezze è possibile comprendere il concetto di "potenziale di membrana". Esso è determinato dalla separazione delle cariche attraverso la membrana cellulare, si esprime in millivolt (mV) e può essere sia positivo che negativo. Generalmente assume valore negativo ed è presente in tutte le cellule, ma le più importanti sono quelle nervose e muscolari, in quanto sono in grado di apportarvi modifiche rapide e transitorie per assolvere alle proprie funzioni. Le cellule nervose adibite a questa funzione si chiamano neuroni e hanno 3 componenti principali: corpo cellulare, dendriti e assone. Quest'ultimo è il prolungamento più grande e serve a trasmettere informazioni sotto forma di segnali elettrici, mentre i dendriti sono più piccoli e fungono da ricevitori per gli assoni dei neuroni interconnessi. In queste cellule il potenziale di membrana si attesta tra i -70 e -90 mV e si parla di un equilibrio dinamico, con variazioni continue dovute al passaggio da un lato all'altro delle molecole che seguono entrambi i gradienti menzionati precedentemente. Ciò è possibile grazie ad alcune proteine poste sulla loro membrana, che vanno a formare dei canali con la funzione di trasporto delle sostanze. Anch'essi possono avere diversi tipi di regolazione, corrispondenti ai gradienti prima citati, per cui possiamo avere canali regolati chimicamente, termicamente, meccanicamente o voltaggio-dipendenti. Queste peculiarità conferiscono alle membrane una proprietà denominata permeabilità selettiva.

- 2) Depolarizzazione: inizia quando giunge lo stimolo e consiste nella perdita della polarità. È una fase fondamentale in quanto le depolarizzazioni devono raggiungere una certa soglia per originare il PDA, altrimenti questo rimane isolato e prende il nome di potenziale graduato. Questa soglia può essere raggiunta con uno stimolo molto forte o con una somma di stimolazioni più piccole. Il processo è reso possibile grazie ai canali per il Na^+ che, raggiunta la soglia, si aprono velocemente e in quantità sempre maggiore, producendo il cosiddetto “ciclo di retroazione positiva”. In questo modo si arriva addirittura ad invertire il potenziale giungendo fino a $+30/+40$ mV; inoltre, il ciclo ne permette la diffusione a tutta la cellula e poi lungo gli assoni. Il rapido e sostanzioso ingresso di sodio è permesso da un breve divario di 0,5 secondi tra l’apertura dei canali e l’inizio della chiusura degli stessi.
- 3) Ripolarizzazione: poco dopo il picco, la membrana comincia un progressivo ritorno ai livelli basali attraverso la concomitanza della chiusura dei canali del Na^+ e l’apertura dei canali voltaggio-dipendenti per il potassio. Il K^+ esce dunque per riportare la polarità iniziale; in questo modo alla fine del PDA le concentrazioni ioniche saranno alterate. Verranno poi ristabilite in un arco di tempo più lungo grazie al lavoro delle pompe sodio-potassio, canali proteici di membrana che trasportano 2 ioni Na^+ fuori dalla cellula e 3 di K^+ all’interno, consumando ATP.
- 4) Iperpolarizzazione: nella fase finale il potenziale diventa momentaneamente più basso del livello normale. Anche in questo caso il motivo riguarda i parametri temporali dei canali, infatti quelli per il potassio si chiudono lentamente causando un piccolo efflusso aggiuntivo rendendo l’interno della cellula ancora più negativo rispetto alla situazione di riposo. Una volta chiusi tutti i canali, la membrana torna ai livelli basali e vi rimane fino a quando non giungerà un altro evento stimolante. Questa fase determina il periodo refrattario relativo, ovvero l’intervallo di tempo in cui è più difficile evocare un PDA, proprio perché essendo l’ambiente più negativo sarà necessaria un’intensità maggiore per arrivare alla soglia. Per questa stessa ragione il potenziale non può diffondersi in maniera retrograda, altrimenti si andrebbe incontro ad un ciclo infinito all’interno dei neuroni.

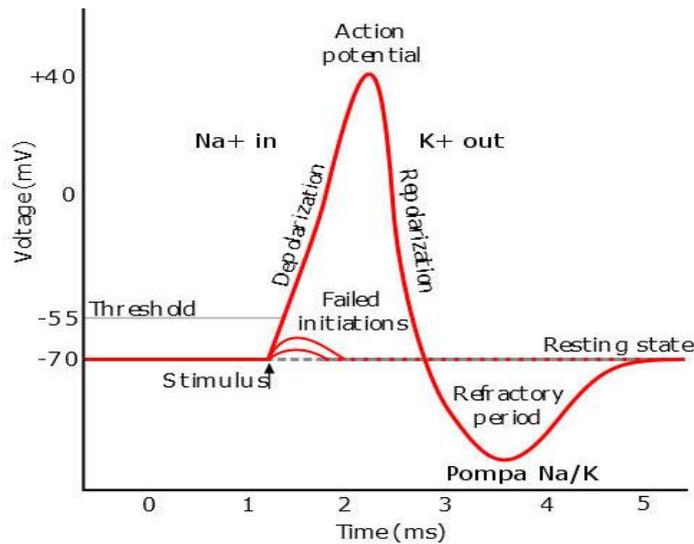


Fig. 1.12: grafico illustrativo della cinetica di un PDA nelle diverse fasi. Si possono osservare la soglia, il picco e il periodo refrattario. Tratta dal web: <https://www.osteolab.net/potenziale-dazione/>

Infine, è importante precisare che il potenziale d'azione, a differenza di quelli graduati, è un fenomeno tutto o nulla. Ciò significa che una volta raggiunta la soglia in una zona della membrana, esso si propaga con la stessa intensità lungo tutta la superficie cellulare, incluso l'assone, per trasmettere informazioni o indurre risposte nel tessuto bersaglio.

Arriviamo ora dunque al rapporto con il muscolo. Quest'ultimo non può contrarsi a meno che non riceva una stimolazione che può arrivare sia dall'interno, tramite il sistema nervoso centrale e periferico (SNC e SNP), oppure dall'esterno artificialmente, con l'applicazione dell'elettrostimolazione. Ciò presuppone che ci siano degli elementi che dal sistema nervoso facciano viaggiare la corrente elettrica fino al muscolo per provocarne l'eccitazione. Le strutture del SNP adibite a tale scopo sono i nervi, ovvero prolungamenti dei neuroni motori somatici (o motoneuroni) che si trovano nel midollo spinale. Quest'ultimi sono in realtà dei "ripetitori", almeno per quanto riguarda i movimenti volontari, dei comandi che arrivano dai centri del SNC posti più in alto. Più precisamente, nell'encefalo si trovano delle aree riservate proprio all'elaborazione dei comandi motori dettati dalla volontà della persona, di cui la più importante è la corteccia motoria primaria. Il segnale parte da qui e viaggia inizialmente mediante le specifiche fibre nervose lungo il midollo spinale fino a trovare il proprio motoneurone. Da qui viene trasferito al rispettivo assone, che lo fa arrivare fino ai muscoli.

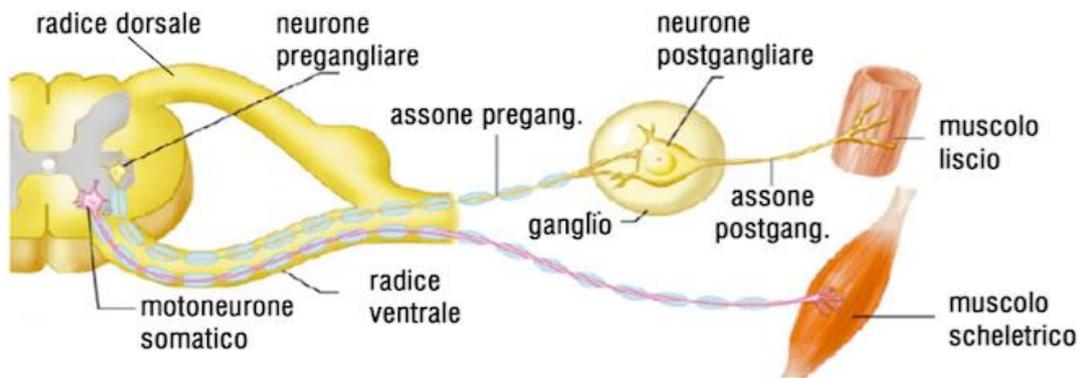
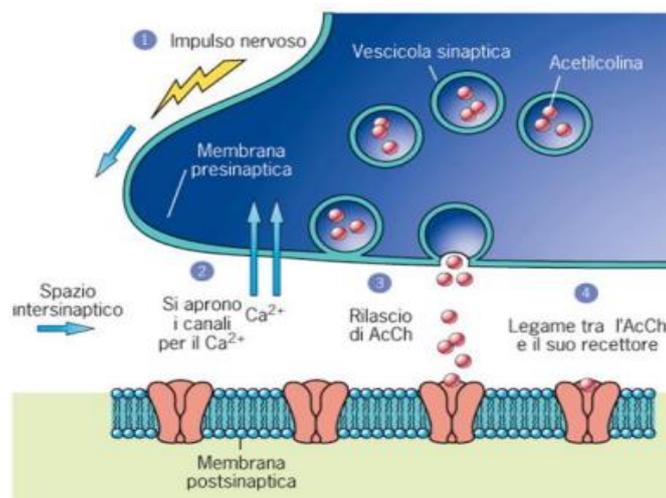


Fig 1.13: Rappresentazione riassuntiva del percorso nervoso dal midollo al muscolo per la sua stimolazione. Tratta dal web: <https://www.chimica-online.it/anatomia-umana/sistema-nervoso-somatico.htm>

L'elemento terminale è una struttura chiamata giunzione neuromuscolare (o placca motrice), che rappresenta l'effettivo collegamento tra i due sistemi ed ha un ruolo preponderante nella trasmissione dello stimolo da ogni neuroni alle proprie fibre. Il processo tramite cui ciò avviene è chiamato sinapsi e consiste nel rilascio di neurotrasmettitori da parte del terminale nervoso nella sottile fessura che la divide dalla membrana ricevente. In questo caso il sarcolemma presenta delle inflessioni per aumentare la superficie di ricezione. La giunzione ha una forma bulbare o a bottone e al suo interno si trovano delle vescicole contenenti acetilcolina (ACh), un mediatore chimico che in questo caso viene escreti mediante esocitosi e captato da specifici recettori sulla membrana muscolare, fungendo così da trasmettitore per il segnale al muscolo provocandone l'eccitazione.

Fig. 1.14: Tutti i componenti della giunzione neuromuscolare. Tratta dal libro "Biologia cellulare e molecolare", Gerald Karp, Edises



Ogni assone si ramifica nella sua parte finale, riuscendo così a formare giunzioni con diverse fibre. In questo modo si ha una distribuzione spaziale e quantitativa dell'attivazione, agevolandone dunque la regolazione.

Il complesso motoneurone-fibre innervate prende il nome di unità motoria (UM). Non c'è un numero fisso di fibre che possono essere controllate dalla stessa UM, ma è stato osservato che nei muscoli che richiedono movimenti precisi come quelli di mani e occhi il numero è molto basso (anche solo 3-6), mentre nei grandi muscoli il cui scopo principale è produrre forza, come il quadricipite, si può arrivare fino a 1000.

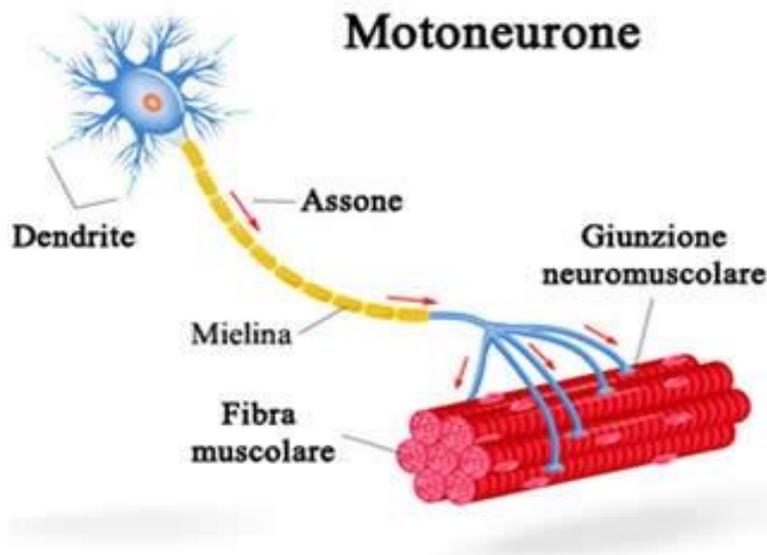


Fig 1.15: Raffigurazione del sistema motoneurone-fibre che compone l'unità motoria. Tratta dal web: <https://sites.google.com/site/lacontrazionemuscolare/home/il-motoneurone>

CAPITOLO 2

LA CONTRAZIONE MUSCOLARE

2.1 MECCANISMI MOLECOLARI ALLA BASE DELLA CONTRAZIONE

Come già detto, per quanto riguarda i muscoli scheletrici l'elemento essenziale per provocare una contrazione è la volontà. Per questa ragione lo stimolo parte dalla corteccia motoria e viaggia sotto forma di potenziale d'azione lungo il percorso nervoso comprendente midollo spinale, motoneurone e assone fino alla placca motrice. Nell'ultimo tratto, lungo l'assone del neurone motorio, il PDA si propaga con una modalità definita "corrente saltatoria". Ciò significa che gli scambi ionici non avvengono su tutto il prolungamento, bensì solo su specifici tratti denominati nodi di Ranvier che si alternano ad altri ricoperti dalle cellule di Schwann, guaine isolanti che favoriscono una conduzione assonale ancora più veloce.

Una volta arrivato sul bottone terminale della giunzione neuromuscolare, il potenziale d'azione induce l'apertura dei canali voltaggio-dipendenti per il Ca^{2+} che, entrando nel bottone terminale, provoca il rilascio dell'acetilcolina per esocitosi nella fessura sinaptica. Il neurotrasmettitore diffonde verso la membrana muscolare verso i propri recettori che sono allo stesso tempo anche canali cationici per sodio e potassio, causandone l'apertura. Nell'ambiente extracellulare il gradiente di concentrazione per questi due ioni è più o meno equivalente, ma quello elettrico è molto più alto per il Na^+ , di conseguenza il flusso in entrata del sodio sarà molto più alto rispetto a quello del K^+ in uscita. Ciò comporta la depolarizzazione della placca e questa variazione prende il nome di potenziale di placca (EPP), in grado di dare origine ad un potenziale d'azione lungo tutta la fibra muscolare.

La GNM solitamente si trova in posizione centrale rispetto alla fibra, in questo modo la conduzione contigua si diffonde verso entrambe le direzioni e quindi arriva rapidamente a tutta la cellula. Come anticipato, i tubuli T sono parte del sarcolemma, per cui la depolarizzazione arriva anche in profondità all'interno della fibra e grazie alla struttura della triade provoca l'apertura delle cisterne terminali del reticolo sarcoplasmatico, con la conseguente fuoriuscita di Ca^{2+} nel LIC. L'aumento della concentrazione intracellulare di questo ione viene considerato l'evento scaturente ed è parte dell'accoppiamento eccitazione-contrazione, cioè l'insieme di eventi nervosi e meccanici che portano la cellula muscolare a contrarsi.

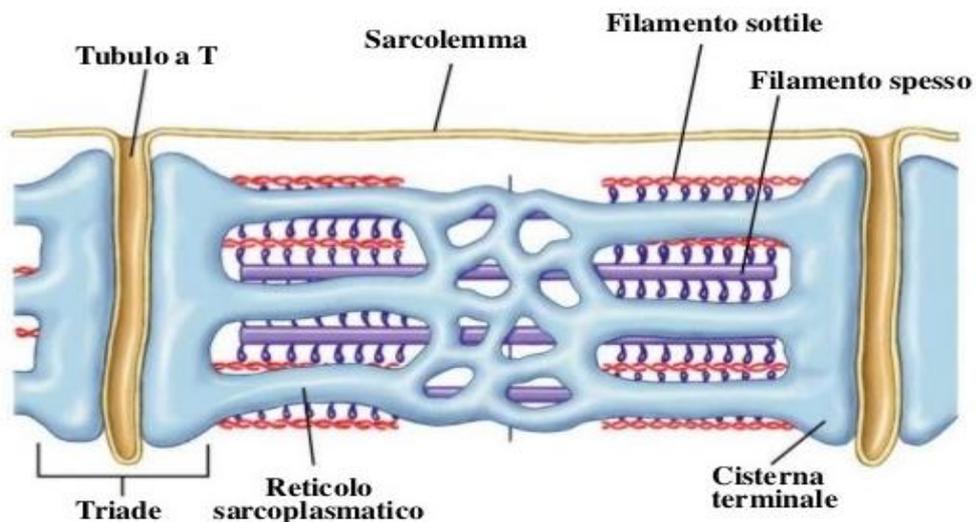


Fig. 2.1: Dettaglio delle strutture che permettono l'espansione del PDA all'interno della fibra: Tratta dal web: <https://sites.google.com/site/lacontrazionemuscolare/home/componenti-e-struttura-muscolare/reticolo-sarcoplasmatico>

Il calcio svolge infatti una funzione essenziale legandosi alla subunità TnC della troponina, inducendo una modificazione conformazionale nei filamenti sottili. Il cambiamento consiste nella traslazione della tropomiosina che va così a liberare i siti di legame dell'actina per la miosina. Da questa situazione può iniziare il vero e proprio meccanismo della contrazione muscolare, vale a dire il cosiddetto ciclo dei ponti trasversali. Questo processo consiste sostanzialmente nello scorrimento dei filamenti sottili su quelli spessi in direzione centrale verso la linea M, di conseguenza trascinando con sé i dischi Z e risultando nell'accorciamento sia della banda I che della banda H. Considerando che ciò avviene in tutti i sarcomeri attivati, anche la lunghezza della fibra in toto sarà diminuita. Più precisamente, dopo la liberazione dei siti per i legami acto-miosinici, possono essere distinte 4 fasi che compongono questo ciclo:

- 1) Formazione del ponte trasversale: nonostante nella stessa molecola di miosina ci siano due teste, ognuna agisce in modo autonomo, legando da sola una molecola di actina. Il legame è possibile solo dopo che la stessa catena pesante lega una molecola di ATP e la idrolizza, formando adenosindifosfato (ADP) e un fosfato inorganico. In questo modo la testa passa alla conformazione attivata, ovvero si ripiega avvicinandosi al filamento sottile e vincolandovisi. A quel punto il fosfato si stacca e il legame diventa ancora più forte.
- 2) Colpo di forza: ad un certo punto anche l'ADP si stacca, fornendo energia per provocare un movimento della testa miosinica che sposta la catena di actina verso il centro. Ogni colpo di forza trascina il filamento per una frazione dell'accorciamento totale, per cui questo processo si ripeterà fino al raggiungimento dell'intensità proporzionale allo stimolo ricevuto.
- 3) Distacco del ponte trasversale: una volta compiuta l'azione, la miosina rimane attaccata all'actina ma il suo sito ATPasico è libero. Sarà proprio il legame con un'altra molecola di ATP a indebolire quello con il filamento e permetterne il rilasciamento, facendola tornare così alla forma inattiva.

- 4) Riattivazione della testa miosinica: infine la nuova molecola di adenosintrifosfato viene idrolizzata riattivando la testa che sarà così pronta a compiere nuovamente la sua funzione, però stavolta su di un'actina più distale. Solitamente, le due teste si alternano nella trazione del filamento in modo che mentre una agisce l'altra abbia il tempo per rigenerarsi.

Quando decidiamo di terminare la contrazione, la corteccia motoria smette di inviare impulsi e di conseguenza si interrompono tutti i potenziali fino alla placca. Da quel momento inizia il processo di rilassamento che prevede: il ritorno elastico alla lunghezza muscolare a riposo (l_0), ricaptazione del Ca^{2+} nel RS grazie alle pompe calcio-ATPasiche, rimozione dell'ACh mediante l'enzima acetilcolinesterasi.

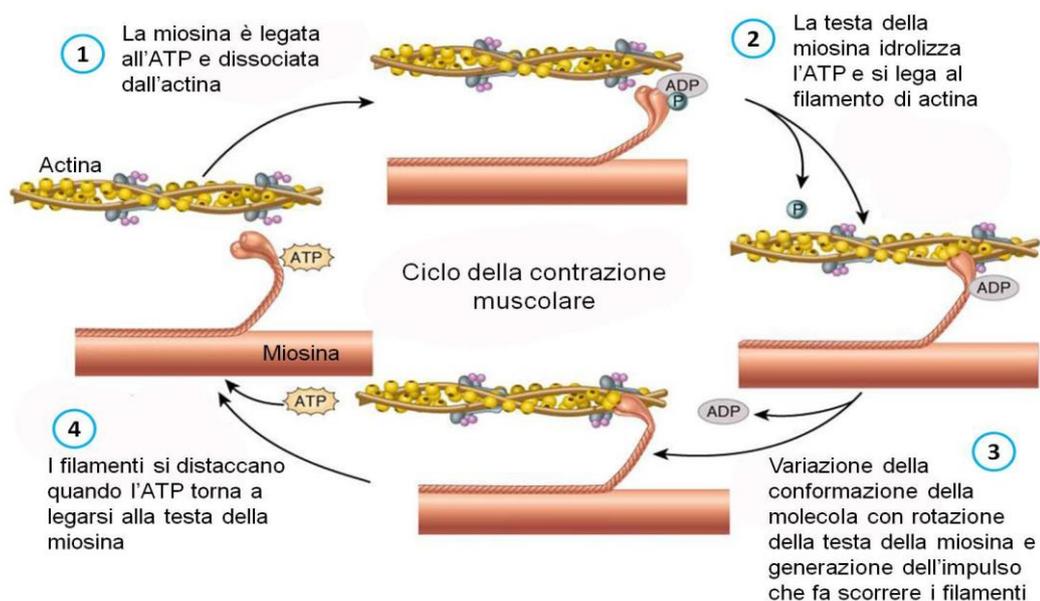


Fig. 2.2: Schema riassuntivo dei passaggi del ciclo dei ponti trasversali. Tratta dal web: <https://sites.google.com/site/lacontrazionemuscolare/home/ciclo-dei-ponti-trasversali>

2.2 MECCANICA MUSCOLARE E TIPI DI CONTRAZIONE

La caratteristica funzionale principale del muscolo è quella di produrre tensione o forza, grazie soprattutto alla loro componente contrattile mediante il processo appena descritto. Come abbiamo visto all'inizio, questa forza non è però trasmessa direttamente dai sarcomeri alle ossa, bensì vi sono le strutture tendinee connettivali che fungono da trasduttori. I tendini vengono anche denominati "componente elastica in serie" del muscolo, infatti hanno un comportamento a molla simile a quello della titina dei miofilamenti.

Esistono principalmente 2 tipi di contrazione:

- Isotonica: è quella più comune, dove c'è sia l'accorciamento delle componenti muscolari intime, sia il movimento dei segmenti ossei su cui il muscolo si inserisce lungo il ROM articolare permesso. In questo modo la tensione muscolare rimane costante mentre la lunghezza varia.
- Isometrica: qui invece ci si trova in una situazione in cui non si riesce a spostare il carico esterno oppure si sviluppa volontariamente una tensione inferiore sufficiente solo a mantenerlo fermo. In questo caso si verifica comunque la contrazione muscolare interna con tutti gli elementi prima descritti, ma la lunghezza muscolare totale rimane costante in quanto non c'è escursione articolare.

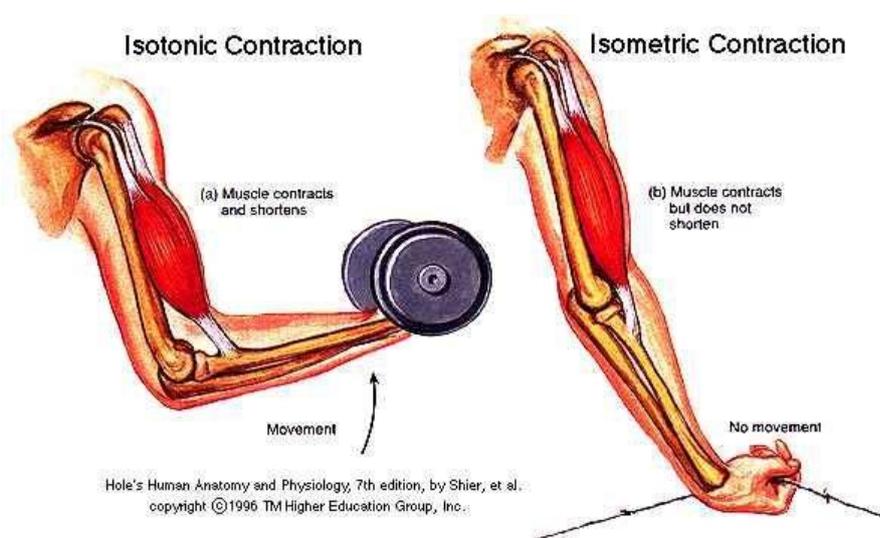


Fig. 2.3: Rappresentazione grafica di una contrazione isotonica e una isometrica. I riferimenti sono nell'immagine stessa.

Si può poi distinguere un'ulteriore divisione all'interno delle contrazioni isotoniche. In particolare, in base al modo in cui la lunghezza varia possiamo averne di 2 tipi:

- **Concentrica**: in questo caso il muscolo va incontro ad un accorciamento sia interno che esterno, quindi la resistenza viene superata e c'è l'avvicinamento dei capi articolari coinvolti.
- **Eccentrica**: al contrario, nelle contrazioni eccentriche il carico è troppo grande per essere vinto oppure siamo noi ad eseguire dei movimenti cedendo appositamente alla resistenza, come può essere la gravità. Alcuni esempi possono essere l'accovacciata, scendere le scale oppure appoggiare un oggetto che non siamo più in grado di tenere in mano perché troppo pesante. Per questa ragione il risultato finale sarà l'allontanamento dei segmenti ossei, quindi avverrà un allungamento muscolare e il lavoro dei sarcomeri sarà volto a contrastarlo. Particolarmente interessante in questo tipo di contrazione è il fatto che essendoci un'elongazione forzata, entrano in gioco anche le componenti elastiche passive come i tendini all'esterno e la titina all'interno. Si pensa infatti che entrambi abbiano un ruolo importante nella produzione di forza in questa contrazione, togliendo così lavoro alla parte contrattile (Abbott 1952).

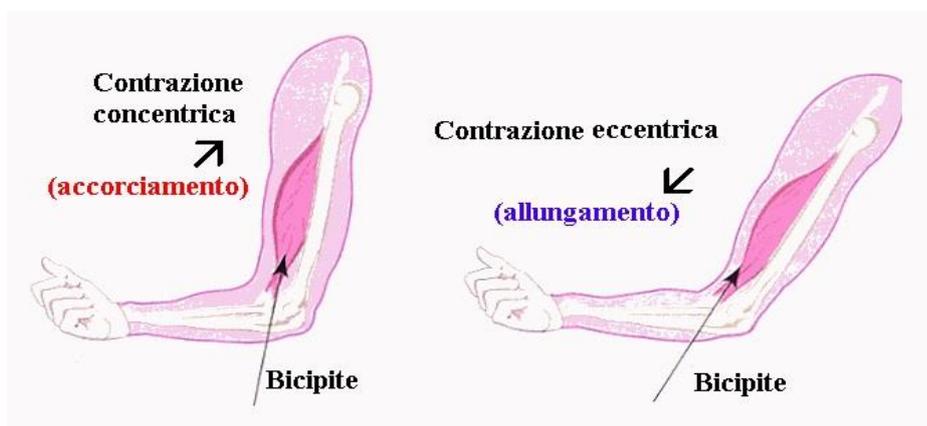


Fig. 2.4: Rappresentazione grafica dei movimenti muscolari e articolari dovuti alle contrazioni concentriche ed eccentriche. Tratta dal web: <https://www.sportwork.net/lesioni-muscolari-come-sono-classificate-e-come-trattarle/>

2.3 RELAZIONE TENSIONE-LUNGHEZZA

Questa relazione è stata descritta da Gordon, Huxley e Julian nel 1966 attraverso uno studio sulle contrazioni isometriche animali a livello sarcomeriale. Si è visto che queste due grandezze muscolari hanno un rapporto molto stretto, ovvero più precisamente, la tensione massima producibile durante una contrazione dipende fortemente dalla lunghezza del muscolo all'inizio di quel processo. In particolare, ogni muscolo possiede una lunghezza ottimale, dove può raggiungere i livelli massimi di tensione. Discostandosi da questa misura in entrambe le direzioni si avrà una diminuzione più o meno lineare e ripida di questa caratteristica. Più dettagliatamente:

Lunghezza ottimale: come già detto, qui si ha il presupposto migliore per la produzione di forza. Il motivo risiede nel fatto che in questa situazione i miofilamenti sono sovrapposti in modo ottimale, per cui è disponibile il massimo numero di ponti trasversali e sono favorite le interazioni acto-miosiniche per compiere lo scorrimento dei filamenti.

Lunghezze inferiori: quando il muscolo si presenta pre-accorciato riesce a sviluppare meno tensione principalmente per due ragioni; la prima è che le catene di actina vengono avvicinate alla banda H dove sono concentrate le code miosiniche, quindi vengono persi alcuni siti di legame per formare i ponti. La seconda riguarda invece i filamenti spessi, infatti man mano che il sarcomero si accorcia, essi vengono sempre più spinti verso le linee Z, fino al punto in cui non sarà più possibile ridurre ulteriormente la lunghezza.

Lunghezze superiori: in questo caso il muscolo è stirato passivamente, ma il risultato sarà il medesimo. Il meccanismo è però inverso, difatti qui i filamenti sottili vengono trascinati dai dischi Z lontano dal centro del sarcomero, perdendo contatto con quelli spessi e di conseguenza anche i siti per l'accoppiamento tra le proteine contrattili.

La lunghezza ottimale si aggira generalmente intorno a l_0 , ma dipende molto sia dall'organismo vivente preso in esame che dal tipo di muscolo analizzato. Si è visto infatti che alcuni muscoli lavorano principalmente al di sotto della lunghezza a riposo, mentre altri svolgono meglio la propria funzione nella situazione contraria.

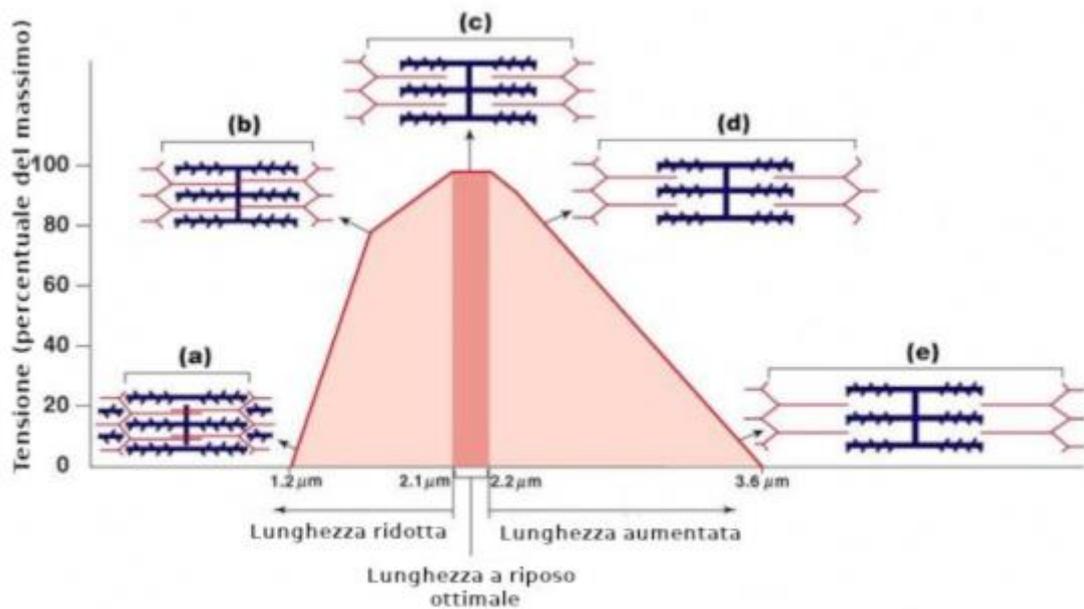
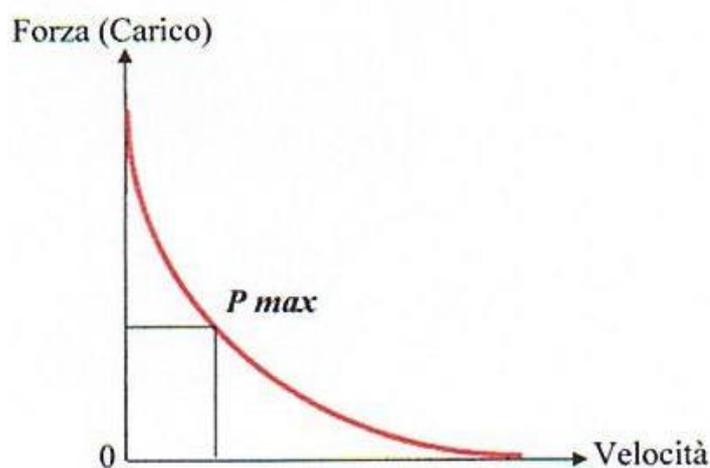


Fig. 2.5: Grafico della relazione tensione-lunghezza. Si può vedere l'andamento del livello di forza massima esprimibile alle diverse misure, con tanto di rappresentazione di un sarcomero nelle fasi più interessanti. Tratta dal web: <https://www.quadernodisport.it/articoli/scienzeDelMovimento/strutturaFunzioneMuscolo/fibreMuscolari.html>

Parlando in termini quantitativi, la lunghezza muscolare estrema non può essere raggiunta in vivo, bensì solo in condizioni sperimentali. Il vincolo al sistema scheletrico rappresenta infatti un limite in questo senso, al punto che generalmente nel corpo i muscoli possono subire una deformazione massima circa del 30%, sia in allungamento che in accorciamento. Anche a questi estremi, il tessuto muscolare è in grado di sviluppare fino a metà della tensione massima. Ad ogni modo, nelle contrazioni dei movimenti quotidiani solitamente la variazione rimane intorno a livelli molto più contenuti.

2.4 LA RELAZIONE FORZA VELOCITÀ

La relazione F-V è una delle proprietà più importanti nello studio delle contrazioni muscolari. È stata descritta nella prima metà del novecento grazie al lavoro del fisiologo A. V. Hill (Hill, 1938) e ripreso poi da Bernhard Katz (Katz, 1939). I loro studi hanno prodotto un grafico, utilizzato ancora oggi, che descrive l'andamento della forza esprimibile dal muscolo a diverse velocità di movimento. È importante precisare che questa grandezza non è intesa in modo assoluto, bensì relativa al tipo di azione compiuta. Nello specifico, viene considerata positiva quando il tessuto si accorcia, nulla se non c'è variazione e negativa se viene allungato. Risulta dunque immediato trasporre questa divisione alle contrazioni concentriche, isometriche ed eccentriche.



*Fig. 2.6: Il grafico di Hill. Tratta dal web:
<https://www.venusfitnessboutique.it/allenamento-e-performance/la-curva-forza-velocita/>*

Si può osservare come la curva della forza si presenti sotto forma di un'iperbole che scende sempre meno ripidamente man mano che si raggiungono livelli di velocità più alti. L'interpretazione più immediata è dunque che all'aumentare della velocità di contrazione il muscolo diminuisce gradualmente la capacità di esprimere forza.

Secondo una teoria del già citato studio di Huxley del 1957, ciò avviene per 2 motivi: il primo riguarda l'aumento di probabilità che alcuni tratti dei miofilamenti scorrano l'uno sull'altro senza creare ponti; il secondo invece, che i legami formati non abbiano il tempo di rilasciarsi e quindi vadano a creare una forza contraria. In questo modo, la forza massima producibile (F_{max}) si ha quando $V=0$, quindi durante contrazioni isometriche. Dal grafico si può estrarre anche un'altra grandezza, chiamata potenza (P), che risulta dal prodotto $F \cdot V$.

Aggiungendo a questo grafico la parte riguardante la velocità negativa, ovvero l'allungamento muscolare, si noterà un'altra iperbole, stavolta però inversa. Difatti, i livelli di forza eccentrica salgono gradualmente assieme alla velocità applicata, appiattendosi poi fino al limite di resistenza del tessuto prima della rottura.

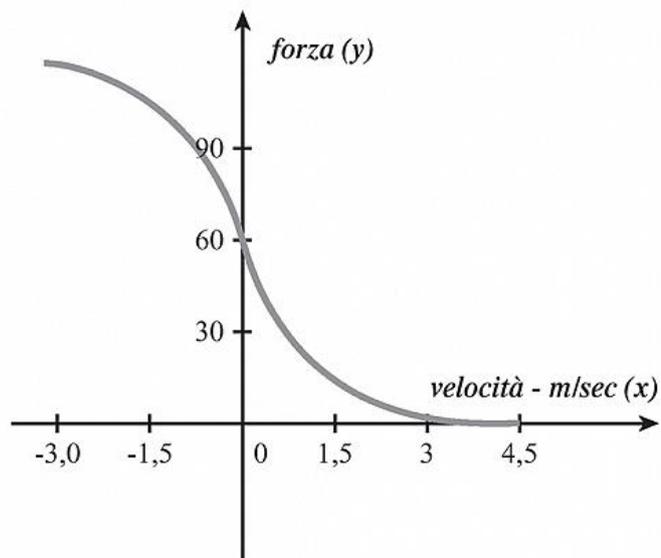


Fig. 2.7: Rivisitazione del grafico di Hill con la fase eccentrica e la doppia iperbole. Tratta dal libro "Principi di metodologia del fitness", A. Paoli (2013), Erika

CAPITOLO 3

CENNI SULL'ARCHITETTURA MUSCOLARE

3.1 DISPOSIZIONE DELLE FIBRE ALL'INTERNO DEL MUSCOLO

L'architettura muscolare può essere definita come la “disposizione delle fibre rispetto all'asse di applicazione della forza muscolare” (Lieber 1992); è un concetto simile alle forme muscolari descritte nel primo capitolo, però più specifico verso la relazione forma-funzione. In questo senso, osservandoli macroscopicamente, i tipi di muscolo possono essere così suddivisi:

- Paralleli: chiamati anche paralleli, dispongono di fibre che decorrono parallelamente all'asse di azione.
- Unipennati: tutte le loro fibre sono orientate con un determinato angolo rispetto all'asse muscolare, di solito compreso tra valori vicini agli 0° e 30° .
- Multipennati: presentano angoli diversi tra le inserzioni delle varie fibre.

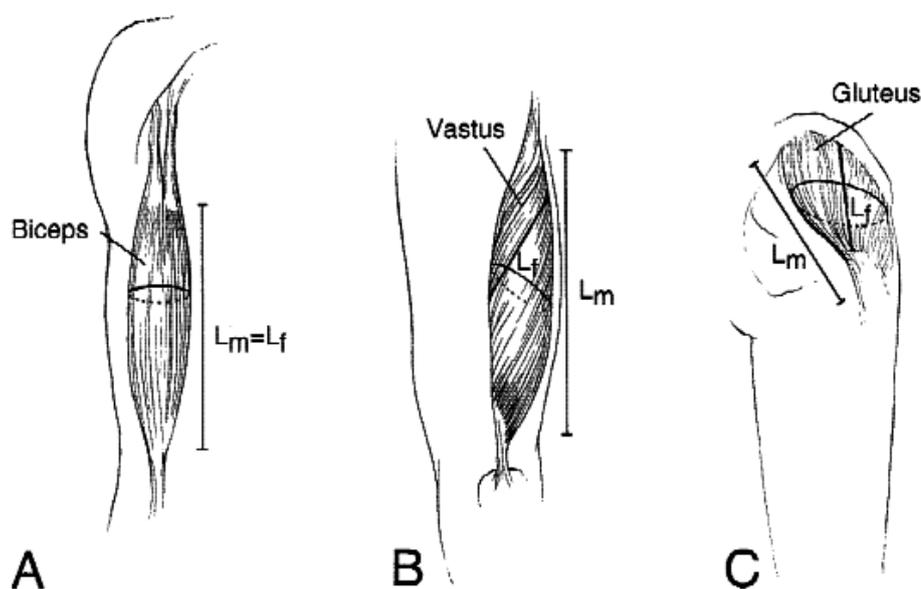


Fig. 3.1: Rappresentazione della suddivisione muscolare nei 3 tipi di architettura. In ordine abbiamo: A) bicipite brachiale, muscolo parallelo; B) vasto laterale del quadricipite, muscolo unipennato; C) medio gluteo, muscolo multipennato. Tratta da: *Functional and clinical significance of skeletal muscle architecture*, R. Lieber, 2000.

I parametri di interesse nell'indagine dell'architettura muscolare sono solitamente la lunghezza muscolare (L_m = muscle length), ossia la distanza tra l'origine delle fibre più prossimali e l'inserzione di quelle più distali; lo spessore muscolare (MT = muscle thickness), cioè la misura della distanza perpendicolare tra l'aponeurosi superficiale e quella profonda; l'angolo di pennazione (PA = pennation angle), definito come l'angolo formato dai fascicoli nella loro inserzione sull'aponeurosi tendinea profonda; la lunghezza dei fascicoli (L_f = fascicle length) e l'area di sezione trasversale fisiologica (PCSA). Quest'ultima è descritta come l'area ottenuta dalla somma di tutte le sezioni trasversali perpendicolari delle fibre di un dato muscolo. Si differenzia così da quella anatomica (ACSA), che è invece estrapolata dalla sezione del ventre muscolare nel punto di massima circonferenza, perpendicolarmente all'asse di forza. È quindi intuibile che nei muscoli paralleli esse coincideranno, mentre in quelli pennati la PCSA sarà maggiore con un'entità che dipende principalmente dalla lunghezza muscolare e dall'angolazione delle fibre. La formula per calcolarla è la seguente, dove “ ρ ” sta per densità muscolare e “ θ ” indica l'angolo di pennazione dei fascicoli:

$$PCSA (mm^2) = \frac{\text{muscle mass (g)} * \cosine \theta}{\rho \left(\frac{g}{mm^3} \right) * \text{fiber length}(mm)}$$

3.2 RAPPORTO FORMA-FUNZIONE

Fatte queste premesse, è possibile ora descrivere come le diverse caratteristiche architettoniche influenzano l'aspetto funzionale del muscolo. Nello specifico, grazie alla distinzione tra ACSA e PCSA, si può capire come l'ipertrofia non sia l'unico aspetto valutabile quando si cerca di interpretare la forza muscolare senza l'ausilio di misure dirette. Al contrario, gli elementi interni prima descritti assumono probabilmente un ruolo maggioritario nella determinazione di questa grandezza. In particolare, per descrivere questa relazione, i parametri più interessanti risultano essere l'area di sezione fisiologica e la Lf, correlate rispettivamente alla massima forza esprimibile e alla massima velocità di accorciamento. Per questo motivo è supponibile che ogni muscolo possieda la struttura architettonica più adatta rispetto alla funzione principale che deve svolgere. Facendo un esempio concreto, possiamo prendere in esame i muscoli della coscia. Il quadricipite femorale (muscolo di particolare interesse per questa tesi) presenta appunto quattro capi muscolari, tutti pennati, mentre il gruppo dei flessori è formato da tre muscoli paralleli (bicipite femorale, semitendinoso e semimembranoso). Nella pratica si riscontra che effettivamente il gruppo degli estensori è molto più forte dell'altro, al contempo però gli ischio-crurali sono più adatti ad eseguire grandi escursioni articolari in breve tempo.

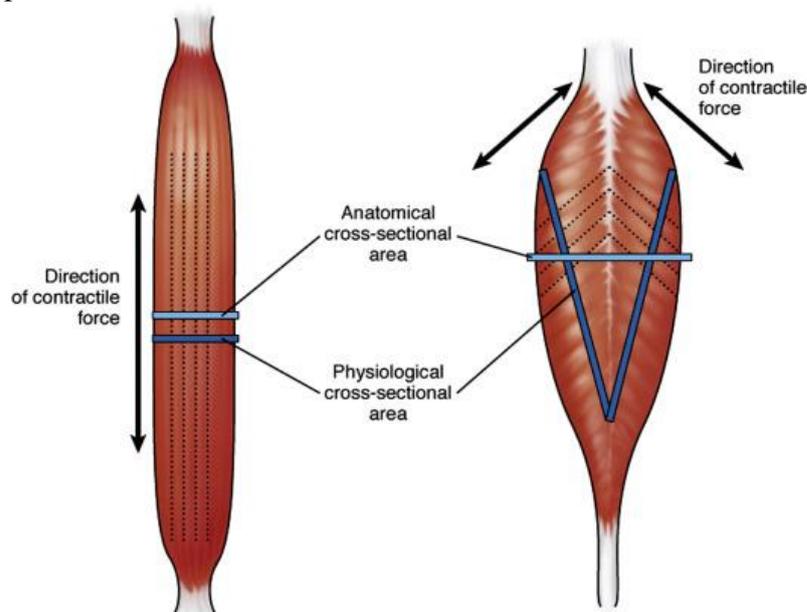


Fig. 3.2: Rappresentazione delle differenze tra PCSA e ACSA tra un flessore (m. parallelo) ed un estensore (m. pennato) del ginocchio. Tratta dal web: <https://www.sciencedirect.com/topics/neuroscience/pennate-muscle>

3.3 CAMBIAMENTI NELL'ARCHITETTURA MUSCOLARE

Il tessuto muscolare possiede una proprietà fondamentale chiamata plasticità, ossia la capacità di variare le sue componenti. Nel corso della vita infatti, ognuno ha delle richieste funzionali diverse in base alle attività che deve svolgere e l'architettura di ogni singolo muscolo può adattarsi di conseguenza. Le principali situazioni che possono indurre questi cambiamenti sono l'invecchiamento, il disuso e il sovraccarico cronico.

Quest'ultimo calza particolarmente con il nostro studio, in quanto l'allenamento contro resistenza (RT= resistance training) è la forma più comune di sovraccarico muscolare nel medio-lungo periodo. Il RT consiste sostanzialmente nell'esecuzione di esercizi che prevedono l'applicazione di un carico esterno progressivo, in opposizione al lavoro muscolare. Può essere fatto sfruttando tutti i tipi di contrazione e solitamente ha il fine di aumentare la forza e/o la dimensione dei muscoli coinvolti, sia in ambito sportivo che di semplice fitness. La modalità più usata è la isotonica, ossia dove si compiono movimenti dinamici a carico costante durante tutto il ROM. Ultimamente però, sta prendendo sempre più piede l'allenamento eccentrico che ha 2 versioni principali: quello "puro", dove viene svolta solo la parte eccentrica del movimento e l'overload eccentrico, usata da noi, dove il carico viene aumentato solo nella fase eccentrica. Queste modalità sono state pensate per sfruttare a pieno la curva forza-velocità che, altrimenti, vedrebbe la parte sinistra del grafico sottostimolata a causa del limite imposto dalla concentrica.

Come anticipato, l'aumento di volume muscolare (ipertrofia) è uno degli adattamenti più considerati, nonché l'unico visibile anche a occhio nudo. Il meccanismo tramite cui i muscoli aumentano la loro massa è stato dimostrato essere maggiormente dipeso dall'accrescimento delle singole fibre, grazie alla proliferazione miofibrillare. L'aumento del numero di fibre (iperplasia) al contrario, non sembra particolarmente coinvolto.

L'ipertrofia muscolare è valutabile quantitativamente tramite tecniche molto semplici come la misura della circonferenza dell'arto interessato, ma anche con strumenti più sofisticati misurando la PCSA e/o la MT (Miyatani 2002). Diversi studi che hanno confrontato le due modalità di allenamento prima descritte non hanno evidenziato differenze significative nel guadagno ipertrofico tra le due.

La lunghezza dei fascicoli dipende principalmente dall'aggiunta di sarcomeri in serie, caratteristica che è stata osservata in alcuni studi di allenamento eccentrico puro o con sovraccarico sia su animali (Lynn e Morgan 1994, Lynn 1998) che umani (Walker 2020, Timmins 2016, Franchi 2014, Reeves 2009, Seynnes 2007). I programmi tradizionali o puramente concentrici non sembrano invece aver particolare effetto. Per quanto riguarda i PA invece, troviamo una situazione praticamente agli antipodi. Diversi studi di allenamento tradizionale o solamente concentrico hanno difatti evidenziato la loro crescita (Timmins 2016, Franchi 2014, Ema 2013, Aagaard 2001), mentre nell'eccentrico ciò si riscontra con entità minore. L'aumento dell'angolo determina un ulteriore distacco dell'andamento dei fascicoli rispetto all'asse di applicazione della forza, causando la perdita di una parte della capacità di produrre tensione in quella direzione. Ciononostante, si crede che il meccanismo alla base di ciò sia l'addizione di sarcomeri in parallelo e quindi un maggior impacchettamento di materiale contrattile che alla fine contribuisce ad accrescere la forza.

Per poter andare a misurare e valutare tutti questi parametri nell'effettivo, è necessario avere a disposizione le tecniche adatte che ci permettano di ottenere immagini *in vivo*, come ad esempio ecografia (B-mode, EFOV, 3-D) o risonanza magnetica. Quella più utilizzata in questo campo è generalmente l'acquisizione di immagini ecografiche, poiché relativamente poco costosa, pratica e affidabile (Franchi 2018, Sarto 2021, Reeves 2004). Successivamente i dati possono essere estrapolati analizzando le immagini attraverso dei programmi che permettono di apportarvi modifiche, per esempio ImageJ (National Institutes of Health, Bethesda, MD, USA).

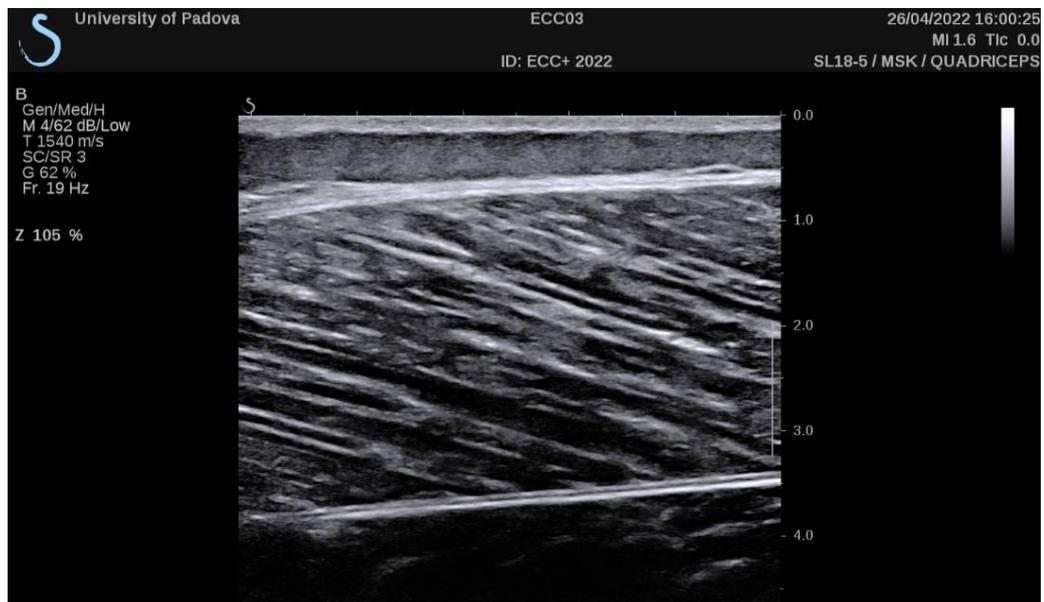


Fig 3.3: Esempio di un'immagine ottenuta per il nostro studio.

CAPITOLO 4

SCOPO DELLA TESI

Il progetto a cui ho partecipato si poneva l'obiettivo di indagare le differenze negli adattamenti morfologici, funzionali e neuromuscolari del muscolo quadricipite dopo un periodo di allenamento contro resistenza tradizionale (CONV) rispetto a quello con sovraccarico eccentrico (ECC). In particolare io mi sono occupato dei cambiamenti nell'architettura muscolare del muscolo vasto laterale (VL), mentre i miei compagni hanno investigato le restanti aree di interesse.

In base alla letteratura scientifica, ci aspettavamo di riscontrare un aumento della "muscle thickness" come risposta ipertrofica all'allenamento con i pesi, senza divergenze significative tra i due gruppi (Franchi 2017). Le aspettative differenti per i rispettivi gruppi riguardavano invece le misure della lunghezza dei fascicoli e degli angoli di pennazione. Nel primo caso infatti, i principali studi ci suggerivano un incremento maggiore nei soggetti ECC (Walker 2020, Franchi 2014, Reeves 2009, Seynnes 2007). Per quanto riguarda i PA invece, le evidenze portavano a ipotizzare una tendenza inversa (Ema 2013, Aagaard 2001). I meccanismi alla base di questa differenza sembrano riguardare le modalità di accrescimento muscolare derivanti dagli stimoli meccanici ricevuti. In particolare, è stato suggerito che il maggior lavoro eccentrico possa portare alla prevalenza dell'addizione di sarcomeri in serie lungo i fascicoli, da cui deriverebbe l'aumento più significativo della Lf. Dall'altra parte nel lavoro convenzionale, dove c'è maggior reclutamento nella fase concentrica, parrebbe favorire il meccanismo di crescita tramite l'aggiunta di sarcomeri in parallelo. (Franchi 2014, 2015; Reeves 2009).

Ad ogni modo, è necessario fare presente che altri lavori simili non hanno evidenziato questi stessi risultati (Blazevich 2007).

CAPITOLO 5

METODI E MEZZI DELLO STUDIO

5.1 RECLUTAMENTO

I criteri di inclusione prevedevano: sia maschi che femmine di età compresa tra 18 e 35 anni, moderatamente attivi e senza gravi infortuni agli arti inferiori negli ultimi 2 anni. Alla fine di questa fase siamo riusciti ad avere 24 soggetti equamente distribuiti tra M e F. Grazie a ciò abbiamo potuto formare 2 gruppi perfettamente omogenei a cui i partecipanti sono stati assegnati tramite randomizzazione. Purtroppo poi nel corso delle settimane 4 soggetti non hanno potuto continuare l'allenamento a causa di infortuni, COVID-19 o impegni personali che non permettevano di rispettare i tempi massimi di distacco tra le sedute.

Gruppo	Sesso	Numero	Età
ECC	M	5	22.6 ± 1.5
	F	5	21.8 ± 0.8
CONV	M	5	21.6 ± 0.5
	F	5	21.8 ± 2.9

Tabella 5.1: Dati dei partecipanti che hanno portato a termine lo studio.

5.2 TEST EFFETTUATI

Tutti i test di seguito descritti sono stati svolti presso il laboratorio di fisiologia neuromuscolare dell'Istituto di Fisiologia dell'Università di Padova e sono da intendersi effettuati solo sulla gamba destra. Prima di iniziare, ogni partecipante ha compilato il proprio consenso informato. Il protocollo prevedeva che la prima sessione per stabilire il livello di baseline individuale avvenisse nella settimana precedente all'inizio dell'intervento, mentre tra l'ultimo allenamento e le misurazioni finali dovevano intercorrere almeno 72 ore. I dati raccolti riguardavano i punti di vista morfologico, funzionale e di attivazione neuromuscolare. Siccome era di mia competenza, io tratterò maggiormente il primo ambito mentre darò solamente una breve panoramica sugli altri due. Nello specifico, questo processo era composto in ordine da:

Acquisizione immagini ecografiche: per questa procedura il partecipante era disteso supino sopra un lettino con le gambe completamente estese e rilassate. Il primo passo, facente parte delle mie mansioni, consisteva nell'individuare il grande trocantere del femore e il margine mediale della rotula tramite palpazione, ovvero i punti di reperi anatomici corrispondenti indicativamente alle inserzioni rispettivamente prossimale e distale del vasto laterale. Dopodiché si procedeva misurando e segnando con un pennarello il 70%, 50% e 30% di questa lunghezza (assumendo come 100% il grande trocantere), in modo da avere un riferimento per il posizionamento della sonda ecografica. Vista la natura operatore-dipendente di questo procedimento, l'unico operatore designato a compierlo è stato il dott. Fabio Sarto. Alcune accortezze prese con la finalità di favorire un buon livello qualitativo sono state: minima pressione esercitata sulla cute in modo da non distorcere l'immagine, posizionamento longitudinale del trasduttore cercando di seguire l'andamento delle fibre muscolari, applicazione di generose quantità di apposito gel trasmissivo. Successivamente le stesse modalità venivano seguite anche per le immagini panoramiche necessarie per la misura della CSA (area di sezione muscolare). In questo caso però, la sonda era orientata trasversalmente ed è stata inclusa anche la parte più prossimale del muscolo. Per approfondire quest'ultimo aspetto rimando alla tesi del mio compagno Davide Ferrara.



Fig. 5.1: Una partecipante sistemata sul lettino mentre l'operatore (dott. Fabio Sarto) posiziona il "probe" e il sottoscritto si occupa dell'acquisizione.

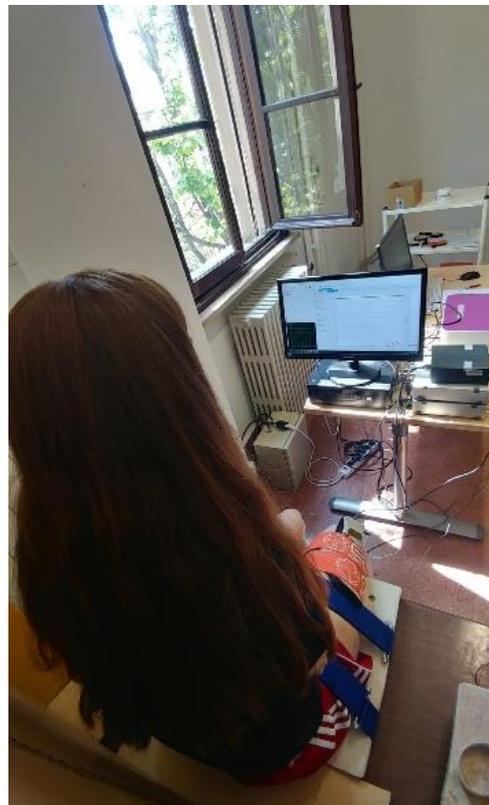
Test MVC isometrico: consiste nella misurazione, mediante l'utilizzo di un dinamometro equipaggiato con una cella di carico, della forza prodotta attraverso la massima contrazione volontaria isometrica unilaterale. In questo caso i partecipanti si trovavano seduti sopra un tavolo facendo sì che il piede non toccasse terra; in più, coscia e caviglia erano bloccate da delle fasce di velcro in modo da avere l'angolo al ginocchio fisso a 90°. Dopo aver eseguito alcune spinte per familiarizzare con il pattern motorio, inclusa una contrazione submassimale, per quelle ufficiali veniva richiesto loro di spingere più forte e più velocemente possibile mantenendo per circa 4 secondi. Inoltre, è stata utilizzata l'elettrostimolazione per avere una misura della capacità di attivazione sovramassimale. Nello specifico, sono state applicate due stimolazioni durante la contrazione e una circa 1 secondo dopo la fine tramite due elettrodi posti prossimalmente e distalmente sopra il quadricipite. Per ognuno sono state effettuate tre prove separate da un minuto di recupero, di cui solo la migliore è stata considerata. Durante queste ultime, tutti loro avevano a disposizione un feedback visivo dell'andamento della forza prodotta; inoltre hanno ricevuto incitamento vocale da parte di noi tesisti e sono stati istruiti a tenere le braccia incrociate sul petto in modo da non potersi aggrappare ad alcun sostegno. Per maggiori dettagli riguardo questo ambito rimando alle tesi dei miei compagni Anna Gobbato e Riccardo Lazzari.



Fig. 5.2: L'impostazione dell'attrezzatura per l'MVC su un soggetto della ricerca. Si possono osservare gli elettrodi per la stimolazione, il dinamometro e i relativi vincoli articolari.

High Density EMG di superficie: quest'ultima parte si basava sulla registrazione del segnale elettromiografico ad alta densità del VL mentre i partecipanti dovevano effettuare delle contrazioni isometriche di intensità variabile tramite la stessa attrezzatura del test MVC. Ciò avveniva seguendo dei “percorsi” predefiniti rappresentati sul grafico della forza. Questi potevano essere di tre tipi: di forma trapezoidale, a “V” rovesciata oppure esplosivi, dove bisognava raggiungere velocemente il 70% della MVC e mantenerlo per 3-4 secondi. La HD-EMG poteva essere ottenuta senza intervenire in modo invasivo grazie ad una matrice da apporre superficialmente dotata di 64 elettrodi in grado di acquisire il segnale di altrettante unità motorie. Al fine di aumentare la qualità della trasmissione, l'area cutanea adibita al posizionamento della matrice veniva prima depilata e trattata con pasta abrasiva. Qui il feedback visivo era ancora più fondamentale per fare in modo che i percorsi venissero seguiti controllando il reclutamento muscolare lungo tutta la durata. Per ulteriori approfondimenti riguardo questo ambito è possibile consultare le tesi dei miei compagni Lorenzo Holneider e Tommaso Rota.

Fig. 5.3: Partecipante allo studio in posizione per la registrazione EMG. In foto si può osservare il setting con cui i soggetti erano vincolati all'attrezzatura e lo schermo tramite cui potevano seguire il grafico della propria forza.



5.3 STUDY DESIGN

Il nostro disegno sperimentale prevedeva 4 settimane di resistance training degli arti inferiori su una leg press della linea Biostrength di Technogym. Questo macchinario aveva diverse modalità di utilizzo, tra cui noi abbiamo usufruito della isotonica e di quella denominata Eccentric+. Grazie a quest'ultima potevamo applicare una maggiorazione del carico nella fase eccentrica, nel nostro caso il coefficiente scelto è stato 1.5 volte rispetto alla concentrica. Per questo motivo è stato deciso di condurre gli allenamenti con la modalità monopodolica, il limite di carico della macchina infatti, sarebbe potuto diventare troppo basso con esecuzione bipodolica per alcuni soggetti. Ulteriori specifiche tecniche verranno descritte alla sezione 5.4.

Il protocollo prevedeva lo svolgimento di 3 sedute a settimana, distanziate da almeno 24 ore, per un totale di 12 sessioni di allenamento. In questo periodo sono state eseguite 4 serie allenanti per le prime tre settimane e 5 nell'ultima. A loro volta queste erano composte da 8 ripetizioni per il gruppo ECC e 10 per il gruppo CONV in modo che il volume totale risultasse equivalente. Il tempo di recupero tra le serie era di 3 minuti. Prima di cominciare veniva effettuato un riscaldamento uguale per tutti, consistente in: 15 squat a corpo libero, 10 ripetizioni con il 30% del carico e altre 10 con il 50% con un recupero di 2 minuti tra i vari step.

		RISCALDAMENTO			ALLENAMENTO				
		Esercizio	Serie	Rip.	Carico	Esercizio	Serie	Rip.	Carico
ECC	Squat	1	15	Corpo libero	Leg press Eccentric+	4 (wk 1-3)	8	70% 1RM	
	Leg press Isotonica	2	10	30-50% 1RM		5 (wk 4)			
CONV	Squat	1	15	Corpo libero	Leg press Isotonica	4 (wk 1-3)	10	70% 1RM	
	Leg press Isotonica	2	10	30-50% 1RM		5 (wk 4)			

Tabella 5.2: Riassunto dei parametri delle sedute di allenamento

NB: wk = settimana

L'intensità delle serie era comune per tutti e corrispondeva al 70% dell'1RM individuale (One Repetition Maximum), stimato indirettamente poiché la misura diretta sarebbe stata molto dispendiosa in termini di tempo e difficile da attuare con soggetti inesperti. Abbiamo dunque optato per un test 6RM, ovvero si ricercava il carico con cui il/la partecipante riuscisse a eseguire un numero massimo di ripetizioni compreso tra 4 e 6. Successivamente il massimale veniva stimato attraverso la formula di Brzycki (Brzycki, 1993):

$$1RM = \frac{Carico}{1,0278 - (0,0278 \times Reps)}$$

Questo processo si ripeteva ogni settimana all'inizio del primo allenamento, così che ci fosse un adeguamento del carico di pari passo con il miglioramento della performance.

Per standardizzare l'ampiezza di movimento (ROM) ogni volta prima di iniziare la serie uno di noi controllava il posizionamento dei piedi e, con un goniometro, misurava l'angolo del ginocchio facendo sì che alla partenza fosse di 90°. Per quanto riguarda il tempo sotto tensione del muscolo (TUT) invece, è stato usato un metronomo che scandisse i secondi in modo da avere 2s sia in fase concentrica che eccentrica. Inoltre, ci siamo serviti di due questionari per registrare le sensazioni soggettive derivanti dall'allenamento, ovvero la "Borg scale" e la "Soreness scale". Quest'ultima è un indice dell'indolenzimento muscolare e veniva presentata sia all'inizio che alla fine per avere un confronto rispetto alla sessione precedente così come all'interno di quella corrente. La prima invece, riguarda la percezione della faticosità dello sforzo compiuto ed era dunque posta solo dopo la conclusione.

Scala RPE Di Borg (CR10)	
10	Massimale
9	Estremamente difficile
8	
7	Molto difficile
6	
5	Difficile
4	Sembra difficile
3	Moderato
2	Facile
1	Molto facile
0	Nessuno sforzo

Fig. 5.4: La scala di Borg utilizzata.

5.4 MATERIALI

Leg press: come anticipato precedentemente, questo macchinario fa parte della linea Technogym Biostrength® (Technogym, Gambettola, Italia) e noi disponevamo di uno dei primi modelli, rilasciati appositamente per il mondo della ricerca. La particolarità di questo attrezzo è che non presenta il pacco pesi tradizionale, bensì è dotato di un motore elettromagnetico posto sotto il carrello. Proprio grazie a questa caratteristica sono presenti diverse modalità di lavoro che permettono di variare il carico all'interno delle stesse ripetizioni. Ciò permette di fornire ai muscoli stimoli molto vari risparmiando tempo e spazio rispetto alle attrezzature utilizzate prima di questa invenzione. Alcuni esempi sono: Elastica, dove il carico, come se fosse un vero elastico, aumenta man mano che si progredisce con il ROM, quindi estendendo le gambe; Viscosa, dove il carico aumenta proporzionalmente alla velocità con cui l'utente sviluppa forza; Spotter, dove il carico viene diminuito se la macchina percepisce cedimento muscolare.



Fig. 5.5: La leg press utilizzata nello studio.

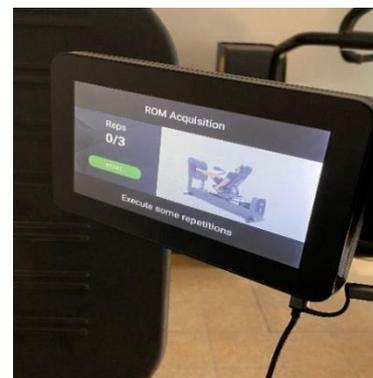
Le modalità da noi usate sono state appunto la Isotonica, con carico costante durante tutto il movimento, e la Eccentrica+. Quest'ultima è senza dubbio la più interessante in quanto permette di apportare un sovraccarico unicamente durante la fase eccentrica dell'esercizio. L'entità di questa maggiorazione può essere modificata entrando nelle impostazioni e cambiando il coefficiente di aumento. Ad ogni modo, per questo studio è stato deciso di mantenere l'incremento predefinito, ovvero 1.5 (+50% del carico concentrico), anche per una questione matematica di pareggio del volume. L'obiettivo di questa variazione è quello di mantenere un più alto grado di reclutamento di fibre anche durante la fase di discesa, ottenendo così maggior lavoro muscolare.



Fig 5.6: Scatto di una seduta di allenamento con il soggetto in spinta monopodolica e un tesista che controlla l'esecuzione e il display del macchinario.

Altra caratteristica molto particolare di questa macchina consisteva nella possibilità di impostare il ROM individuale prima di iniziare le serie di allenamento. Grazie a questa funzione avevamo la certezza che ogni soggetto partisse e si fermasse con un angolo al ginocchio di 90° , in quanto era lo stesso carrello con la seduta che si bloccava alla fine. In aggiunta, la leg press memorizzava il punto di massima estensione ed era quindi in grado di sapere esattamente in quale momento aumentare il peso.

Fig. 5.7: Dettaglio del mini-schermo da cui si poteva impostare il ROM e successivamente selezionare modalità e carico da applicare.



Ecografo: per l'acquisizione delle immagini dello studio è stato utilizzato un ecografo Supersonic, modello Aixplorer Ultimate (Supersonic Imagine, Aix-en-Provence, Francia). Più specificamente, per quanto riguarda l'architettura muscolare, ci siamo avvalsi della sonda lineare da 50mm in dotazione, vale a dire la SuperLinear SL 18-5.



Fig. 5.8: L'ecografo usato per lo studio. Tratta dal relativo sito web: <https://www.supersonicimagine.com/Aixplorer-MACH2/Aixplorer-Ultimate>

Software:

- ImageJ: per analizzare le immagini ed ottenere i dati relativi ai parametri architettureali è stato usato questo già citato programma. È uno strumento che consente di modificare i file disegnando linee e/o figure in modo da poter effettuare misurazioni, dopo aver impostato l'apposita scala metrica rispetto ai pixel. Nel dettaglio, il primo passo consisteva nell'individuare le aponeurosi superficiale e profonda e tracciarne i prolungamenti rettilinei linearmente rispetto all'ultimo tratto visibile. Questa operazione serviva per poter poi estrapolare i fascicoli non completamente inclusi nell'immagine tramite la stessa tecnica. La parte visibile era invece segnata mediante rette segmentate al fine di seguire le loro curvature fisiologiche. I PA venivano invece ottenuti attraverso lo specifico strumento che consisteva nel disegno di due rette, una parallela all'aponeurosi e l'altra al fascicolo considerato, così che il vertice stesse esattamente sulla loro intersezione. Questa stessa funzionalità risultava poi utile per tracciare le linee perpendicolari tra le aponeurosi e quindi poter prendere le misure di spessore muscolare. Per ogni parametro sono state prese almeno tre misurazioni, di cui è stata calcolata la media che veniva successivamente considerata come dato effettivo.

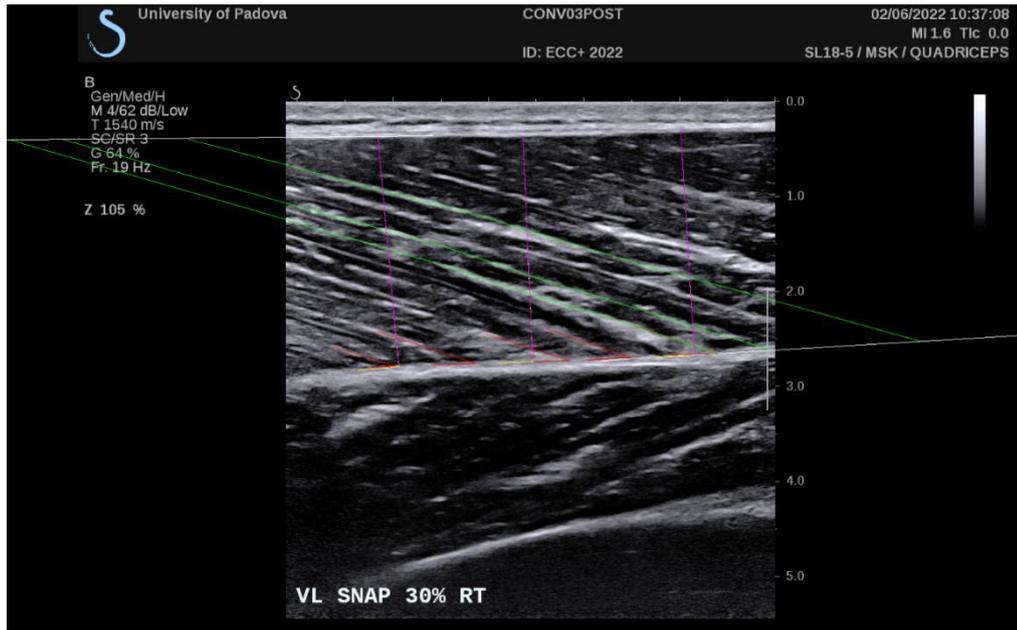


Fig. 5.9: Esempio di un'immagine dello studio analizzata con ImageJ. Si possono vedere dall'alto al basso la cute, un sottile strato di grasso sottocutaneo, aponeurosi superficiale, ventre muscolare del VL, aponeurosi profonda. A destra è presente la scala in cm e le linee viola, rosse e verdi rappresentano rispettivamente le misure di MT, PA e Lf.

- Microsoft Excel: questo programma, basato su fogli di calcolo, è stato un supporto fondamentale per tutta la durata dello studio. Inizialmente ci è servito per organizzare tutti i dati dei partecipanti, mentre successivamente, tramite un apposito modello, per inserire tutti i parametri dell'allenamento sessione per sessione di ogni soggetto in modo da tenerne traccia. Dopo il protocollo sperimentale, è stato utile per organizzare i dati provenienti dall'analisi della immagini, prima di ogni singolo soggetto e poi con le tabelle riassuntive. Infine, per rappresentare i cambiamenti delle diverse variabili, è stata sfruttata la funzionalità di creazione grafici, che verranno presentati nel prossimo capitolo.

Analisi statistica: le differenze nel tempo (baseline e post allenamento) di entrambi i gruppi sono state valutate mediante un test ANOVA a due vie.

La significatività delle differenze tra i due gruppi nei diversi parametri invece, è stata verificata attraverso un T-test per campioni indipendenti.

CAPITOLO 6

ANALISI DATI E RISULTATI

In questa sezione verranno presentati, tramite grafici, tabelle e descrizioni derivanti dall'analisi dei dati, gli effettivi adattamenti nei parametri dell'architettura muscolare avvenuti in conseguenza al nostro studio. I confronti effettuati riguardano le differenze tra situazione basale e post-allenamento di entrambi i gruppi, vista anche soggetto per soggetto e in aggiunta la diversità tra maschi e femmine. Da segnalare che è stato deciso di non prendere in considerazione le variazioni regionali, bensì soltanto i dati provenienti dalle immagini prese al 50% della lunghezza muscolare, poiché questa risulta essere la più rappresentativa.

6.1 SPESSORE MUSCOLARE

Di seguito i grafici sulle variazioni nella muscle thickness. Come si può vedere, in entrambi i gruppi c'è stato un aumento dei valori di MT, ma leggermente maggiore nel gruppo convenzionale. Ciononostante, questa differenza non ha raggiunto la significatività statistica.

GRUPPO	M.T. PRE \pm D.S. (cm)	M.T. POST \pm D.S. (cm)	VAR. \pm D.S. (%)
ECC	2.15 \pm 0.36	2.28 \pm 0.43	5.75 \pm 6.24
CONV	2.18 \pm 0.49	2.38 \pm 0.55	8.46 \pm 5.33

Tab. 6.1: Diversità nei valori di MT tra i due gruppi.

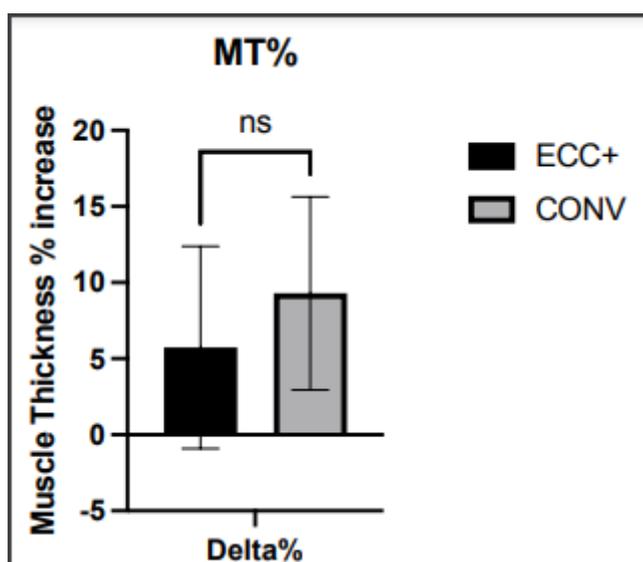
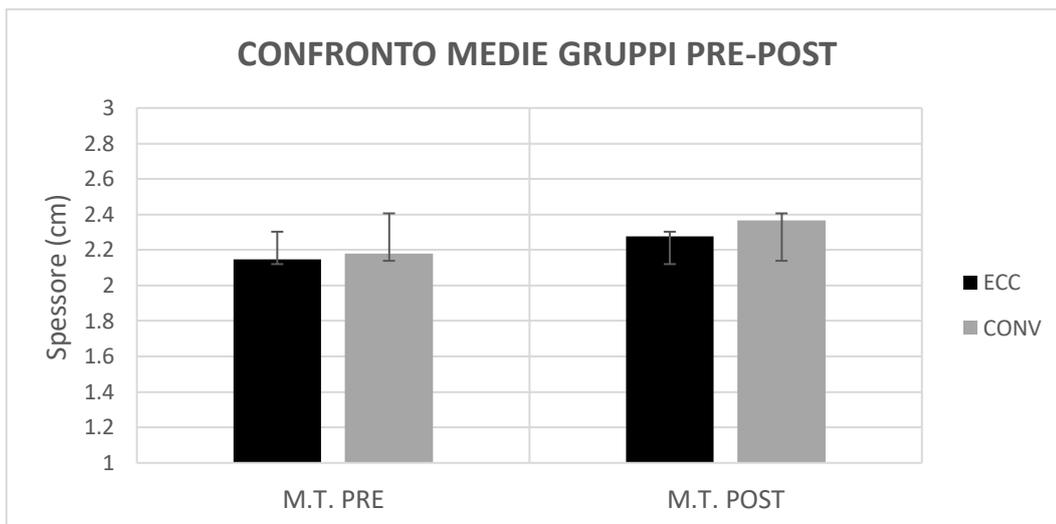
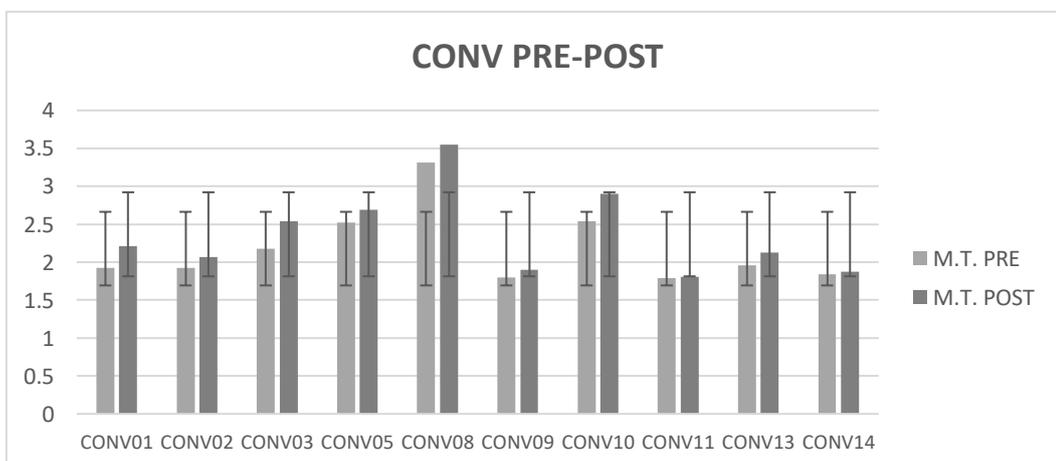
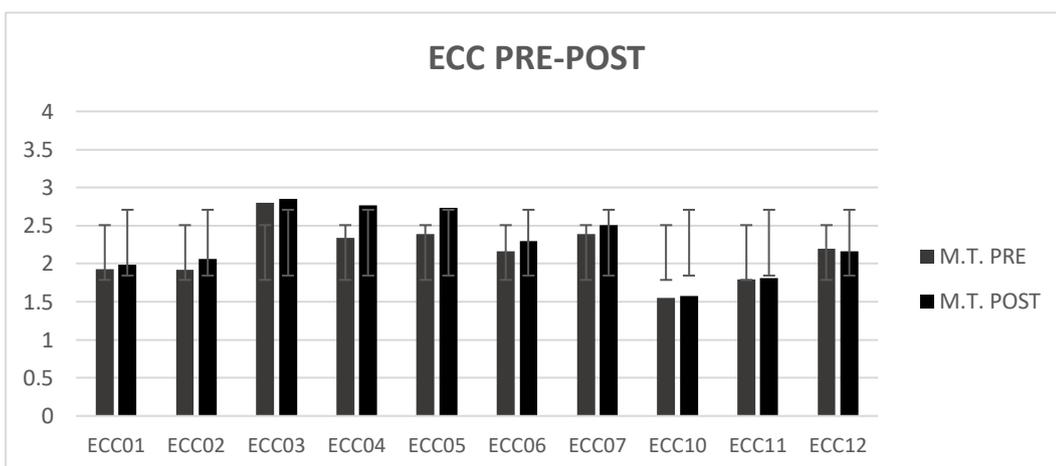


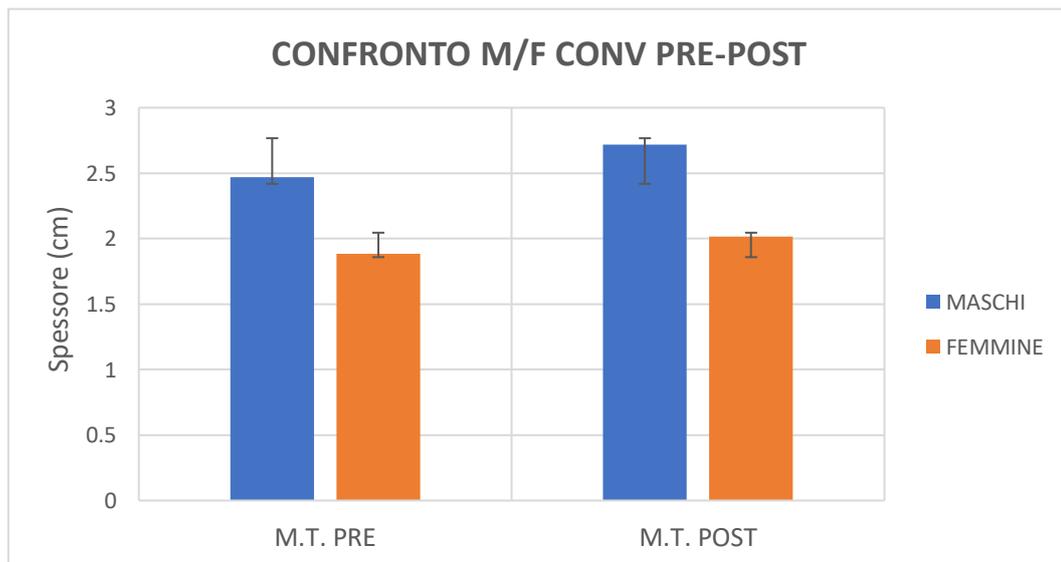
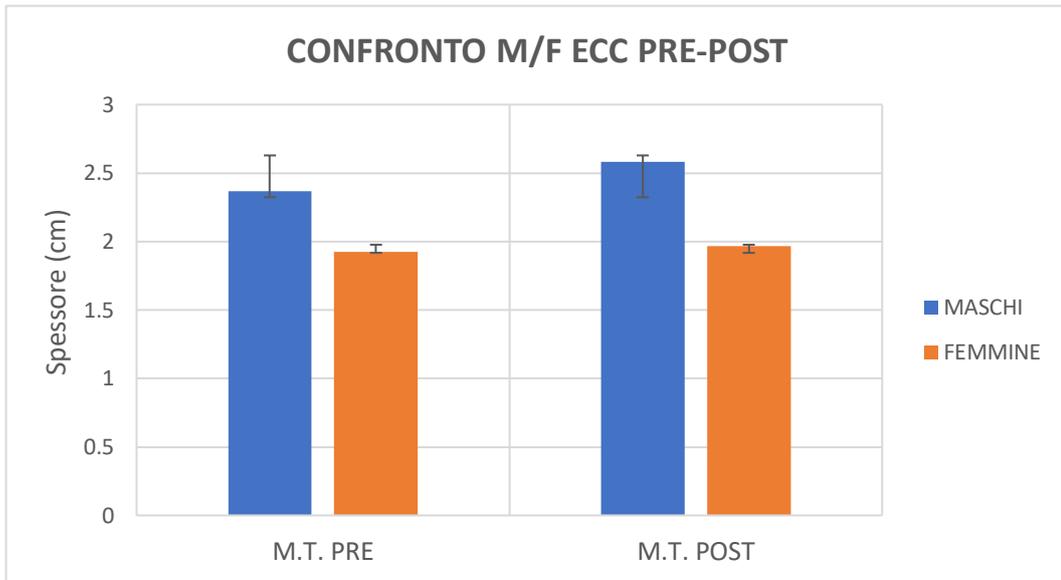
Fig. 6.1: Grafico sulla differenza statistica tra ECC e CONV.



Ora sono invece presentate le variazioni avute singolarmente da ogni soggetto.



Inoltre, è interessante anche vedere il confronto tra maschi e femmine all'interno dei diversi gruppi. Come si può evincere dai grafici, in entrambi i casi i soggetti maschili hanno ottenuto un guadagno maggiore, ma in maniera particolare nel gruppo ECC.



6.2 ANGOLI DI PENNAZIONE

A seguire sono proposti grafici e tabelle sui cambiamenti nel grado di pennazione dei fascicoli. Anche qui si può vedere come in entrambi i gruppi vi sia stato un aumento di questo parametro, in misura maggiore nel gruppo CONV. In questo caso però, questa diversa tendenza è risultata significativa anche dal punto di vista statistico.

GRUPPO	P.A. PRE \pm D.S. (°)	P.A. POST \pm D.S. (°)	VAR. \pm D.S. (%)
ECC	17.86 \pm 2.16	18.15 \pm 2.16	1.66 \pm 2.1
CONV	17.39 \pm 1.25	18.2 \pm 1.22	4.79 \pm 2.79

Tab. 6.2: Diversità nei valori di PA tra i due gruppi.

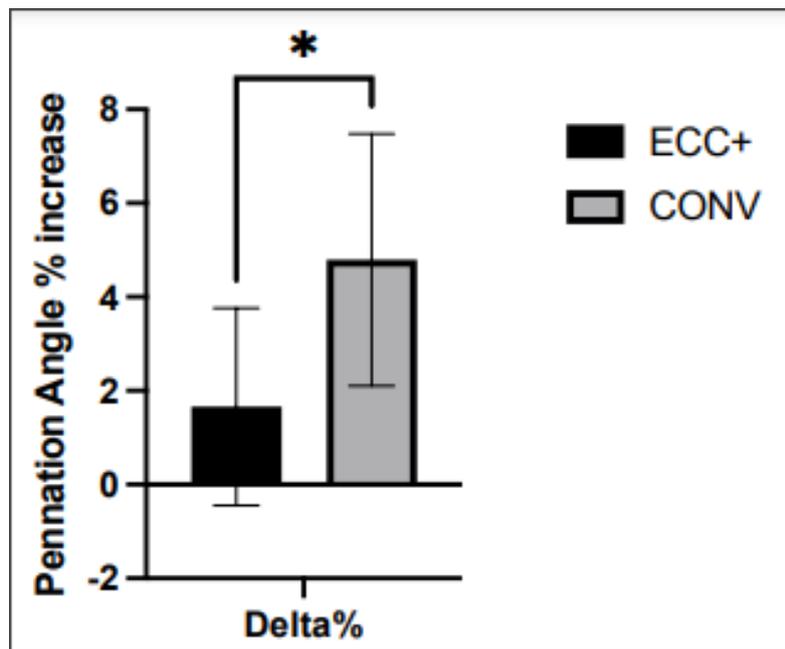
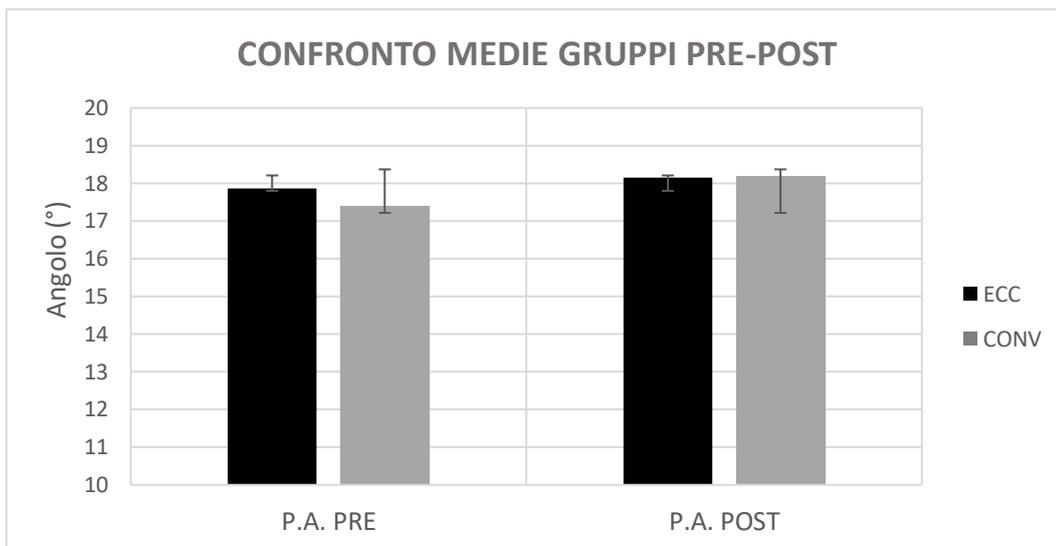
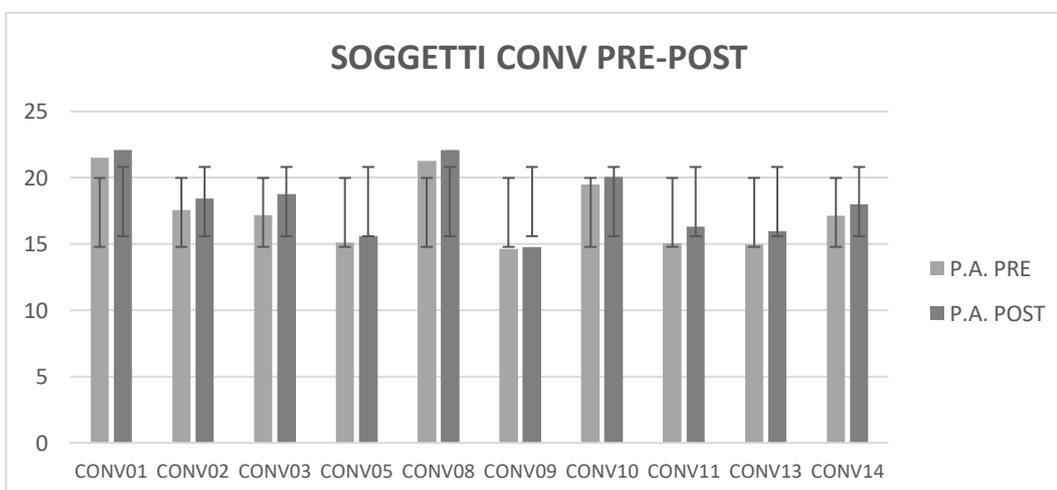
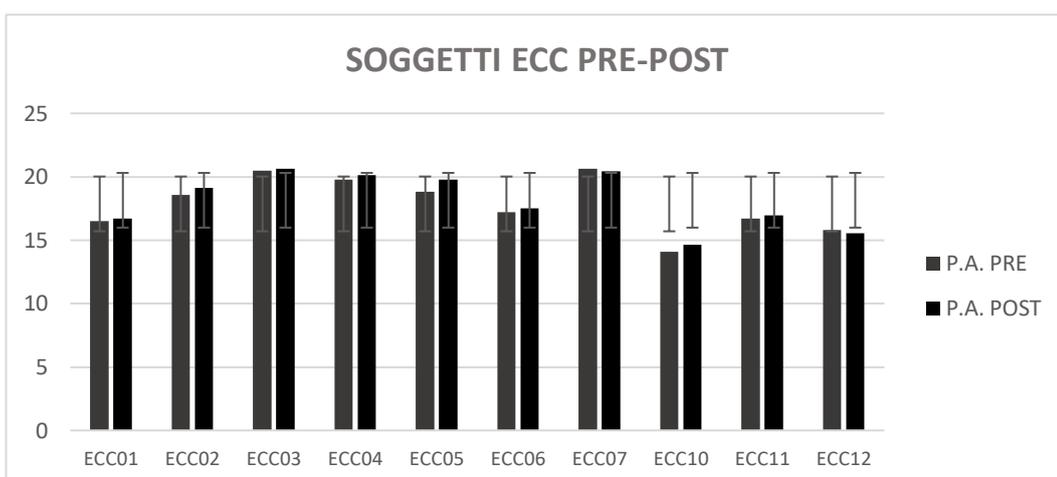


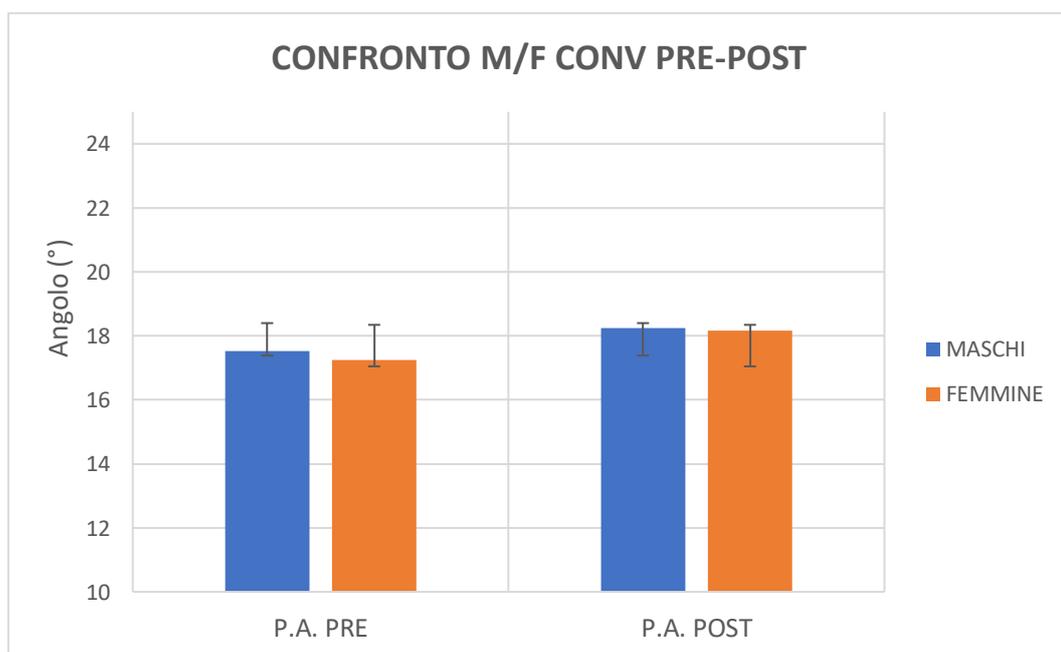
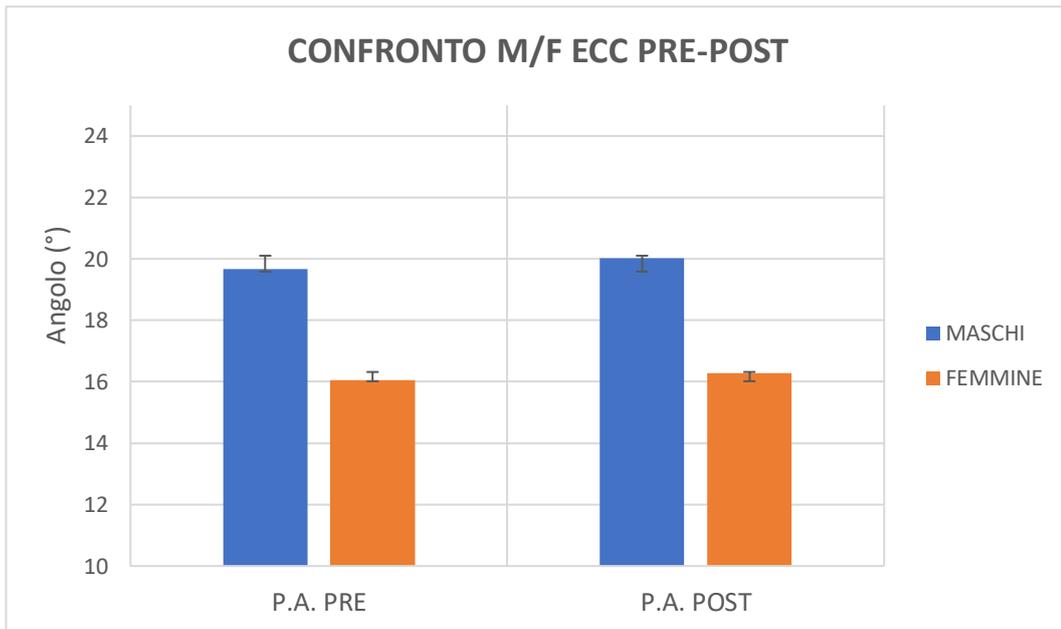
Fig. 6.2: Grafico sulla differenza statistica tra ECC e CONV. L'asterisco indica la significatività.



Ecco la situazione dei cambiamenti avvenuti per ogni persona nei rispettivi gruppi.



Anche in questo caso siamo andati ad indagare la differenza tra genere nei due gruppi, ma non si evidenziano divergenze nel cambiamento relativo in nessun gruppo. In ogni caso, è possibile osservare una tendenza interessante, ovvero che nel gruppo CONV i soggetti femminili hanno avuto un maggior guadagno rispetto ai maschi, mentre nell'eccentrico la situazione è inversa.



6.3 LUNGHEZZA DEI FASCICOLI

Per quanto riguarda quest'ultimo parametro, c'è stato un incremento da ambo le parti, risultato maggiore nel gruppo con sovraccarico eccentrico. Questo divario non ha però raggiunto la significatività statistica.

GRUPPO	Lf PRE \pm D.S. (cm)	Lf POST \pm D.S. (cm)	VAR. \pm D.S. (%)
ECC	7.28 \pm 0.54	7.48 \pm 0.56	2.75 \pm 1.92
CONV	8.09 \pm 1.25	8.21 \pm 1.22	1.49 \pm 1.93

Tab. 6.3: Diversità nei valori di Lf tra i due gruppi.

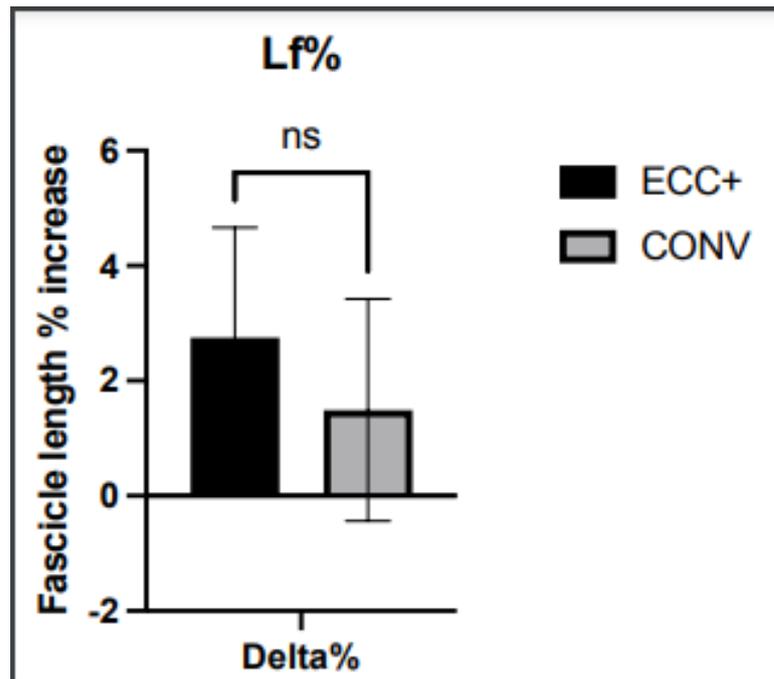
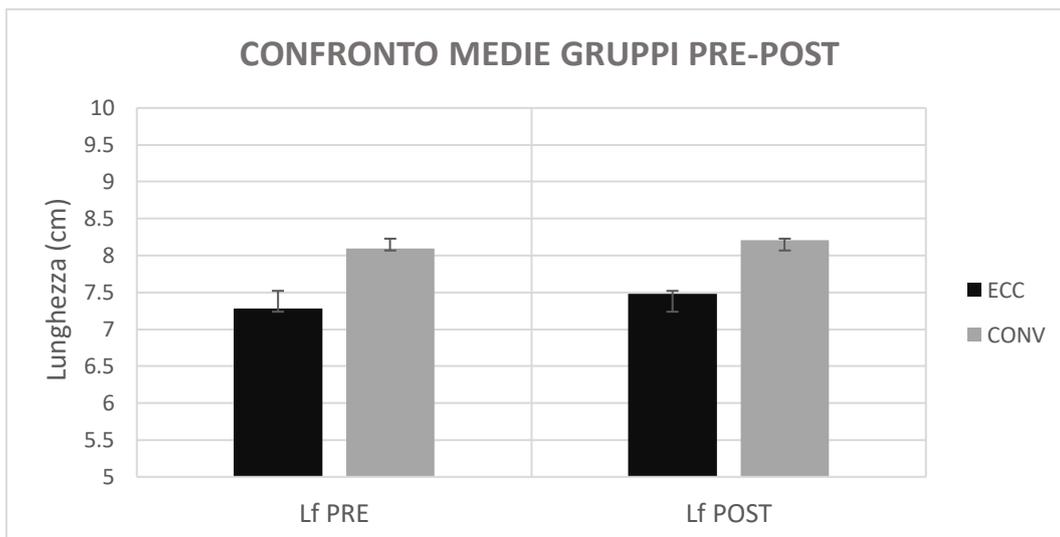
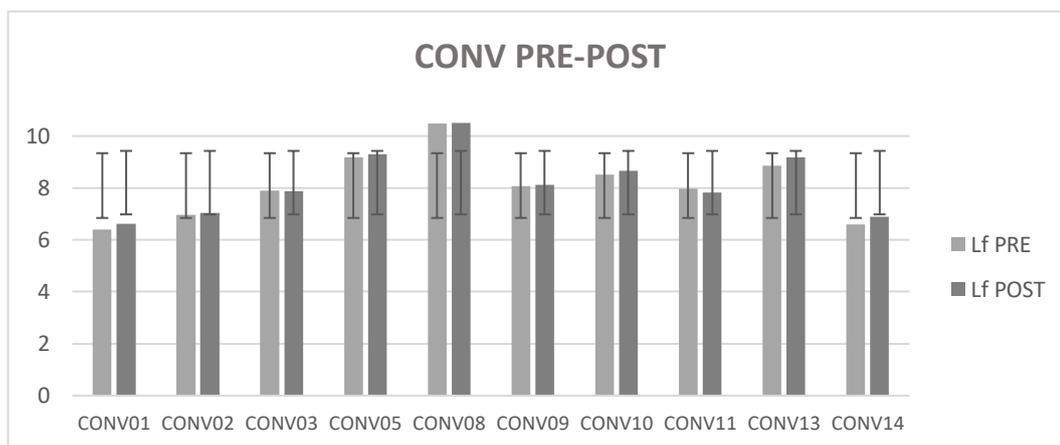
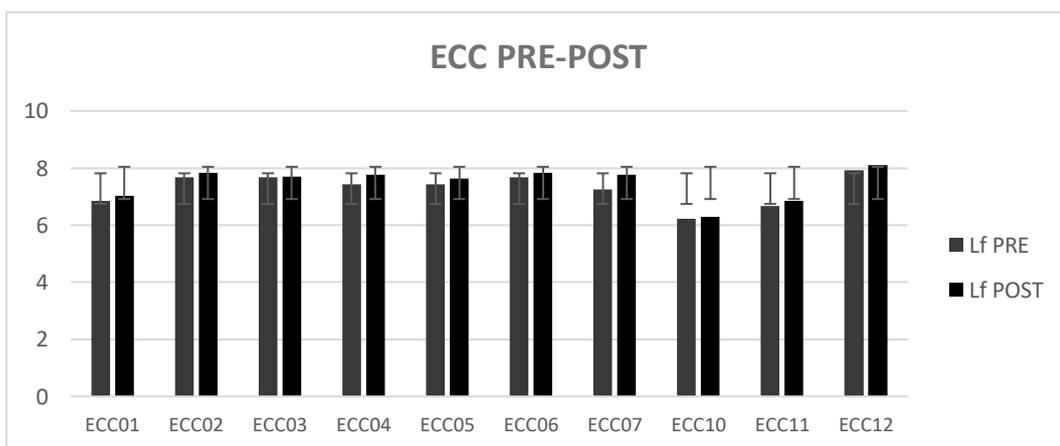


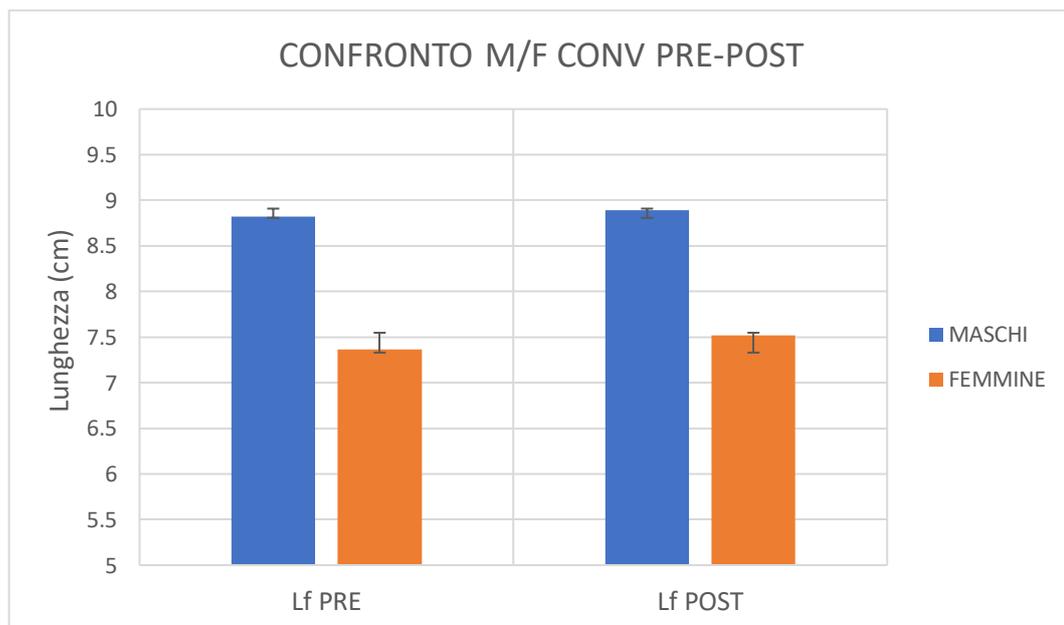
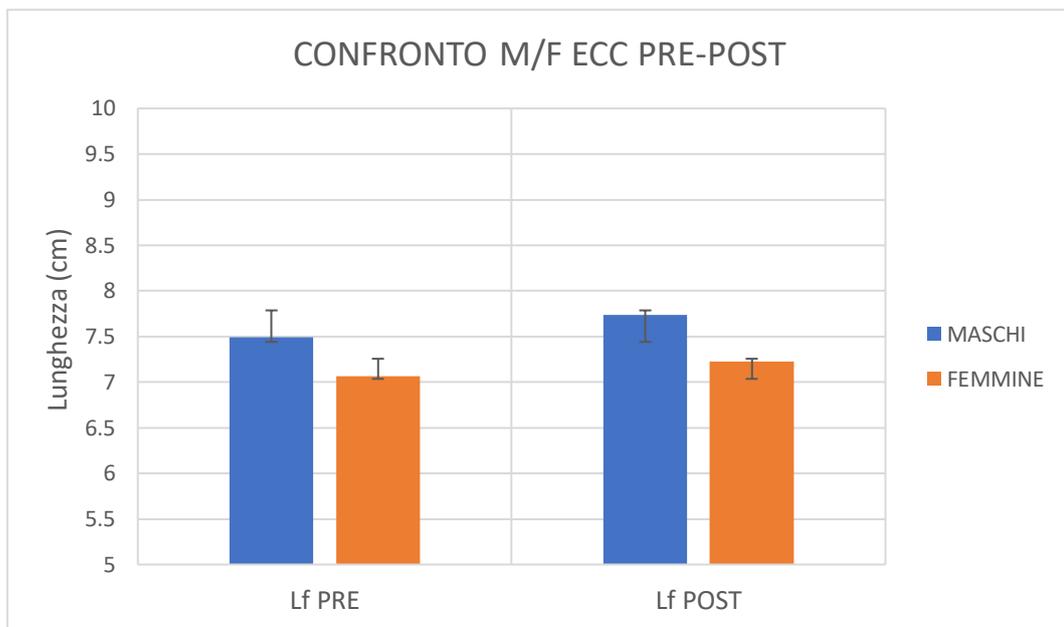
Fig. 6.3: Grafico sulla differenza statistica tra ECC e CONV.



Di seguito la situazione per ogni soggetto singolarmente.



Ecco infine le differenze tra maschi e femmine. Anche qui, come per i P.A., si può notare che, nel gruppo convenzionale le femmine subiscono una variazione relativa di poco superiore ai soggetti maschili, mentre in ECC avviene il contrario.



CAPITOLO 7

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

In questo studio ci siamo posti l'obiettivo di valutare le differenze tra i cambiamenti nell'architettura del muscolo vasto laterale dopo 4 settimane di allenamento convenzionale o con sovraccarico eccentrico. Considerati i risultati esposti nel capitolo precedente, possiamo concludere che:

Per quanto riguarda la muscle thickness, entrambi i gruppi hanno sviluppato un significativo aumento dello spessore del muscolo dopo il periodo di training, mentre la differenza tra i due gruppi, come si prospettava dalla letteratura, non è risultata statisticamente significativa. È stata però osservata una tendenza di crescita superiore nel gruppo convenzionale, il che è sorprendente poiché, vista la maggiore attivazione muscolare che l'overload eccentrico comporta (Sarto 2020), ci saremmo aspettati una situazione inversa. In conclusione, possiamo dunque dire che, anche dopo solamente 4 settimane, entrambe le modalità di allenamento portano ad ipertrofia muscolare e lo fanno in misura simile.

Anche nel caso degli angoli di pennazione vi è stato un incremento significativo generale tra lo stato basale e quello post-intervento, ma in questo caso è stata riscontrata significatività pure nella differenza tra gruppi. Più precisamente, i partecipanti CONV hanno riportato un aumento maggiore rispetto all'eccentrico ($4.79\% \pm 2.79$ vs $1.66\% \pm 2.1$).

La situazione della fascicle length è invece opposta, infatti è stato riscontrato un maggiore aumento relativo nel gruppo ECC rispetto al convenzionale ($2.75\% \pm 1.92$ vs $1.49\% \pm 1.93$). Ad ogni modo, bisogna tenere conto del fatto che in questo caso non è stata raggiunta la significatività statistica, cosa che invece è stata rilevata nel confronto pre-post di ogni gruppo.

Alla luce di quanto appena riportato, è ipotizzabile che i meccanismi che portano all'ipertrofia muscolare differiscano in base al tipo di stimolo ricevuto. Come già citato precedentemente, questo fenomeno potrebbe essere spiegato dal fatto che nell'allenamento con overload eccentrico si ha un maggiore stress nella fase di

allungamento, per cui potrebbe essere favorita l'aggiunta di sarcomeri in serie, mentre nell'allenamento tradizionale rimane preponderante il meccanismo che porta all'accrescimento in parallelo del materiale contrattile. Il fatto che nel nostro caso non sia stata riscontrata significatività nella variazione di Lf può essere dovuto alla durata più breve rispetto agli altri studi presi in considerazione (Blazevich 2006). Oltre a ciò, potrebbe aver influito anche la diversa modalità, in quanto nella maggior parte dei progetti precedenti è stato svolto un allenamento puramente eccentrico, che fornisce quindi un tipo di stimolo differente dal nostro.

Infine, abbiamo deciso di investigare anche le diversità tra maschi e femmine per ogni gruppo riguardo tutti i parametri analizzati.

Nella valutazione della MT è emerso che i maschi sembrano avere una risposta ipertrofica superiore, in maniera particolare nel gruppo eccentrico. Diversamente, in letteratura le evidenze indicano una crescita omogenea riguardo l'ipertrofia derivante dall'allenamento contro resistenza (Roberts 2020), ma non sono presenti studi che abbiano esplorato questa differenza intergenere con un protocollo di sovraccarico eccentrico. Per questo motivo, siamo portati a ipotizzare che questo protocollo di allenamento potrebbe agevolare maggiormente la risposta ipertrofica nel sesso maschile rispetto al femminile.

Per quanto riguarda le altre due misure, è emersa una tendenza interessante, ovvero che nel gruppo CONV le femmine hanno registrato un incremento maggiore sia nei P.A. che nelle Lf rispetto ai soggetti maschili, mentre nel gruppo eccentrico la situazione è inversa. La nostra ipotesi per spiegare questo fenomeno è che, siccome il volume muscolare medio di partenza è inferiore, nel sesso femminile la risposta ipertrofica all'allenamento tradizionale non sia preferenziale verso un meccanismo rispetto all'altro, bensì essi vengono sfruttati entrambi equivalentemente.

Prospettive personali

Per concludere questo progetto, saranno ora presentati alcuni elementi secondo me utili per la continuazione dell'esplorazione di questo affascinante e ancora poco conosciuto metodo di allenamento.

Innanzitutto è necessario fare presente che, considerate le tendenze osservate in tutti i parametri, con un campione maggiore sarebbe più probabile riuscire ad arrivare alla significatività statistica. In questo modo si potrebbe dimostrare la validità delle teorie sui diversi meccanismi a cui il muscolo ricorre in base allo stimolo ricevuto. Inoltre, sarebbe sicuramente utile anche aumentare il tempo di allenamento, con lo stesso obiettivo finale statistico appena citato.

Infine si ritiene che, implementate queste accortezze, potrebbe essere interessante effettuare lo stesso tipo di studio su campioni diverse. Ad esempio, sarebbe intrigante investigare gli adattamenti apportati alla popolazione già avvezzata al RT, magari aumentando il volume di allenamento anche con l'implemento di movimenti diversi grazie a possibili nuovi macchinari futuri.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Aagaard P, Andersen JL, Dyhre-Poulsen P, Leffers AM, Wagner A, Magnusson SP, Halkjaer-Kristensen J, Simonsen EB. A mechanism for increased contractile strength of human pennate muscle in response to strength training: changes in muscle architecture. *J Physiol*. 2001 Jul 15;534(Pt. 2):613-23. doi: 10.1111/j.1469-7793.2001.t01-1-00613.x. PMID: 11454977; PMCID: PMC2278719.
- 2) Abbott BC, Bigland B, Ritchie JM. The physiological cost of negative work. *J Physiol*. 1952 Jul;117(3):380-90. doi: 10.1113/jphysiol.1952.sp004755. PMID: 14946742; PMCID: PMC1392548.
- 3) Blazevich AJ, Gill ND, Deans N, Zhou S. Lack of human muscle architectural adaptation after short-term strength training. *Muscle Nerve*. 2007 Jan;35(1):78-86. doi: 10.1002/mus.20666. PMID: 17039464.
- 4) Blazevich AJ, Cannavan D, Coleman DR, Horne S. Influence of concentric and eccentric resistance training on architectural adaptation in human quadriceps muscles. *J Appl Physiol* (1985). 2007 Nov;103(5):1565-75. doi: 10.1152/jappphysiol.00578.2007. Epub 2007 Aug 23. PMID: 17717119.
- 5) Douglas J, Pearson S, Ross A, McGuigan M. Chronic Adaptations to Eccentric Training: A Systematic Review. *Sports Med*. 2017 May;47(5):917-941. doi: 10.1007/s40279-016-0628-4. PMID: 27647157.
- 6) Ema R, Wakahara T, Miyamoto N, Kanehisa H, Kawakami Y. Inhomogeneous architectural changes of the quadriceps femoris induced by resistance training. *Eur J Appl Physiol*. 2013 Nov;113(11):2691-703. doi: 10.1007/s00421-013-2700-1. Epub 2013 Aug 15. PMID: 23949789.
- 7) Erskine RM, Jones DA, Maganaris CN, Degens H. In vivo specific tension of the human quadriceps femoris muscle. *Eur J Appl Physiol*. 2009 Aug;106(6):827-38. doi: 10.1007/s00421-009-1085-7. Epub 2009 May 26. PMID: 19468746.
- 8) Franchi MV, Atherton PJ, Reeves ND, Flück M, Williams J, Mitchell WK, Selby A, Beltran Valls RM, Narici MV. Architectural, functional and molecular responses to concentric and eccentric loading in human skeletal muscle. *Acta Physiol (Oxf)*. 2014 Mar;210(3):642-54. doi: 10.1111/apha.12225. PMID: 24387247.
- 9) Franchi MV, Wilkinson DJ, Quinlan JI, Mitchell WK, Lund JN, Williams JP, Reeves ND, Smith K, Atherton PJ, Narici MV. Early structural remodeling and deuterium oxide-derived protein metabolic responses to eccentric and concentric loading in human skeletal muscle. *Physiol Rep*. 2015 Nov;3(11):e12593. doi: 10.14814/phy2.12593. PMID: 26564061; PMCID: PMC4673627.
- 10) Franchi, Martino & Reeves, Neil & Narici, Marco. (2017). Skeletal Muscle Remodeling in Response to Eccentric vs. Concentric Loading: Morphological, Molecular, and Metabolic Adaptations. *Frontiers in Physiology*. 8. 10.3389/fphys.2017.00447.
- 11) Franchi, Martino & Raiteri, Brent & Longo, Stefano & Sinha, Shantanu & Narici, Marco & Csapo, Robert. (2018). Muscle Architecture Assessment: Strengths, Shortcomings and New Frontiers of in Vivo Imaging Techniques. *Ultrasound in Medicine & Biology*. 10.1016/j.ultrasmedbio.2018.07.010.

- 12) Fukunaga T, Kawakami Y, Kuno S, Funato K, Fukashiro S. Muscle architecture and function in humans. *J Biomech.* 1997 May;30(5):457-63. doi: 10.1016/s0021-9290(96)00171-6. PMID: 9109557.
- 13) Gordon AM, Huxley AF, Julian FJ. Tension development in highly stretched vertebrate muscle fibres. *J Physiol.* 1966 May;184(1):143-69. doi: 10.1113/jphysiol.1966.sp007908. PMID: 5921535; PMCID: PMC1357552.
- 14) Horowitz R, Kempner ES, Bisher ME, Podolsky RJ. A physiological role for titin and nebulin in skeletal muscle. *Nature.* 1986 Sep 11-17;323(6084):160-4. doi: 10.1038/323160a0. PMID: 3755803.
- 15) Huxley AF. Muscle structure and theories of contraction. *Prog Biophys Chem.* 1957;7:255-318. English, Italian. PMID: 13485191.
- 16) K. S. Saladin, “Anatomia umana”, 2° edizione, PICCIN
- 17) Katz B. The relation between force and speed in muscular contraction. *J Physiol.* 1939 Jun 14;96(1):45-64. doi: 10.1113/jphysiol.1939.sp003756. PMID: 16995114; PMCID: PMC1393840.
- 18) L. Sherwood “Fondamenti di fisiologia umana”, 4° edizione, PICCIN.
- 19) Lieber RL, Fridén J. Functional and clinical significance of skeletal muscle architecture. *Muscle Nerve.* 2000 Nov;23(11):1647-66. doi: 10.1002/1097-4598(200011)23:11<1647::aid-mus1>3.0.co;2-m. PMID: 11054744.
- 20) Lynn R, Morgan DL. Decline running produces more sarcomeres in rat vastus intermedius muscle fibers than does incline running. *J Appl Physiol* (1985). 1994 Sep;77(3):1439-44. doi: 10.1152/jappl.1994.77.3.1439. PMID: 7836150.
- 21) Lynn R, Talbot JA, Morgan DL. Differences in rat skeletal muscles after incline and decline running. *J Appl Physiol* (1985). 1998 Jul;85(1):98-104. doi: 10.1152/jappl.1998.85.1.98. PMID: 9655761.
- 22) Miyatani M, Kanehisa H, Kuno S, Nishijima T, Fukunaga T. Validity of ultrasonograph muscle thickness measurements for estimating muscle volume of knee extensors in humans. *Eur J Appl Physiol.* 2002 Jan;86(3):203-8. doi: 10.1007/s00421-001-0533-9. PMID: 11990727.
- 23) Narici M, Franchi M, Maganaris C. Muscle structural assembly and functional consequences. *J Exp Biol.* 2016 Jan;219(Pt 2):276-84. doi: 10.1242/jeb.128017. PMID: 26792340.
- 24) Reeves ND, Maganaris CN, Narici MV. Ultrasonographic assessment of human skeletal muscle size. *Eur J Appl Physiol.* 2004 Jan;91(1):116-8. doi: 10.1007/s00421-003-0961-9. Epub 2003 Nov 25. PMID: 14639480.
- 25) Reeves ND, Maganaris CN, Longo S, Narici MV. Differential adaptations to eccentric versus conventional resistance training in older humans. *Exp Physiol.* 2009 Jul;94(7):825-33. doi: 10.1113/expphysiol.2009.046599. Epub 2009 Apr 24. PMID: 19395657.
- 26) Roberts BM, Nuckols G, Krieger JW. Sex Differences in Resistance Training: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Strength Cond Res.* 2020 May;34(5):1448-1460. doi: 10.1519/JSC.0000000000003521. PMID: 32218059.
- 27) Sarto F, Franchi MV, Rigon PA, Grigoletto D, Zoffoli L, Zanuso S, Narici MV. Muscle activation during leg-press exercise with or without eccentric overload. *Eur J Appl Physiol.* 2020 Jul;120(7):1651-1656. doi: 10.1007/s00421-020-04394-6. Epub 2020 May 23. PMID: 32447452.

- 28) Sarto F, Spörri J, Fitze DP, Quinlan JI, Narici MV, Franchi MV. Implementing Ultrasound Imaging for the Assessment of Muscle and Tendon Properties in Elite Sports: Practical Aspects, Methodological Considerations and Future Directions. *Sports Med.* 2021 Jun;51(6):1151-1170. doi: 10.1007/s40279-021-01436-7. Epub 2021 Mar 8. PMID: 33683628; PMCID: PMC8124062.
- 29) Seynnes OR, de Boer M, Narici MV. Early skeletal muscle hypertrophy and architectural changes in response to high-intensity resistance training. *J Appl Physiol* (1985). 2007 Jan;102(1):368-73. doi: 10.1152/jappphysiol.00789.2006. Epub 2006 Oct 19. PMID: 17053104.
- 30) Timmins RG, Ruddy JD, Presland J, Maniar N, Shield AJ, Williams MD, Opar DA. Architectural Changes of the Biceps Femoris Long Head after Concentric or Eccentric Training. *Med Sci Sports Exerc.* 2016 Mar;48(3):499-508. doi: 10.1249/MSS.0000000000000795. PMID: 26460634.
- 31) Walker S, Trezise J, Haff GG, Newton RU, Häkkinen K, Blazevich AJ. Increased fascicle length but not patellar tendon stiffness after accentuated eccentric-load strength training in already-trained men. *Eur J Appl Physiol.* 2020 Nov;120(11):2371-2382. doi: 10.1007/s00421-020-04462-x. Epub 2020 Aug 9. PMID: 32772246; PMCID: PMC7560914.