

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Scienze Biomediche

Corso di Laurea Triennale in Scienze Motorie

Tesi di Laurea

**ANALISI DEGLI ADATTAMENTI FUNZIONALI NEL
QUADRICIPITE FEMORALE IN RISPOSTA AD ALLENAMENTO
DI FORZA CON O SENZA SOVRACCARICO ECCENTRICO**

Relatore: Prof. Martino Franchi

Correlatore: Dott. Fabio Sarto

Laureando: Anna Gobbato

N° di matricola: 1223190

Anno Accademico 2021/2022

INDICE

INTRODUZIONE.....	4
CAPITOLO 1 - CENNI DI FISIOLOGIA MUSCOLARE.....	6
1.1 Struttura del muscolo scheletrico.....	6
1.2 Architettura muscolare.....	9
1.3 Proprietà del muscolo.....	10
1.4 Meccanismo della contrazione muscolare.....	10
1.4.1 Tipologie di contrazione.....	12
1.5 Muscoli come leve.....	13
1.6 Relazione forza-lunghezza.....	15
1.7 Relazione forza-velocità.....	16
1.8 RFD – Rate of Force Development.....	18
1.9 Il quadricipite femorale.....	20
CAPITOLO 2 - ADATTAMENTI INDOTTI DALL'ALLENAMENTO DELLA FORZA.....	22
2.1 Ipertrofia e aumento di forza.....	22
2.2 Eccentric overload.....	24
CAPITOLO 3 – ELETTROSTIMOLAZIONE, ITT.....	25
CAPITOLO 4 – SCOPO DELLO STUDIO.....	28
CAPITOLO 5 – MATERIALI E METODI.....	28
5.1 Partecipanti.....	28
5.2 Study design.....	29
5.3 Leg press technogym.....	31
5.4 Variabili considerate: volume di allenamento, scale di borg e soreness, GPaq.....	32
CAPITOLO 6 - ANALISI DEI DATI.....	36
CAPITOLO 7 – RISULTATI.....	37
CAPITOLO 8 – DISCUSSIONE E CONCLUSIONI.....	44
BIBLIOGRAFIA.....	47

INTRODUZIONE

Il presente lavoro si occupa di studiare quelli che sono gli adattamenti che si verificano nel muscolo quadricipite femorale dopo un periodo di allenamento di forza con o senza sovraccarico nella fase eccentrica confrontandoli.

È già noto come la fase eccentrica, rispetto alla concentrica, determini migliori incrementi in termini di forza come dimostrato in uno studio (Bottinelli R, Reggiani C. Human skeletal muscle fibres: molecular and functional diversity. Prog Biophys Mol Biol. 2000) in cui sono stati testati 20 soggetti maschi allenati con un programma eccentrico su un dinamometro isocinetico per un periodo di 12 settimane: sono stati evidenziati aumenti di forza eccentrica e isometrica fino alla fine delle settimane; aumento, invece, che si è fermato all'ottava per la forza concentrica. Si può quindi dedurre come l'incremento di forza concentrica sia stato inferiore e non correlato agli effetti neurali, mentre i guadagni di forza eccentrica e isometrica fino a 8 settimane di allenamento sono spiegati dall'aumento dell'attivazione neurale e della massa muscolare invece nelle ultime 4 settimane sembrano essere associati ad altri meccanismi.

Una recente revisione (Brooks SV. Current topics for teaching skeletal muscle physiology. Adv Physiol Educ. 2003), inoltre, suggerisce che dopo 5 settimane, in un gruppo allenato con un volano dotato di una resistenza intrinseca che consente il sovraccarico eccentrico, si evidenziano significativi aumenti, oltre che nel carico sollevato, anche nella CSA del quadricipite in tutti i suoi fasci a differenza di quanto osservato in un gruppo allenato con una macchina con il pacco pesi convenzionale in cui ci sono stati aumenti solo nel retto femorale. Questo supporta, quindi, l'idea che il sovraccarico eccentrico offre potenti stimoli, essenziali per ottimizzare i benefici dell'esercizio di resistenza.

Vogliamo però andare a vedere quanto questi parametri aumentano realmente. L'analisi e lo studio di questo argomento sono il frutto di un'esperienza formativa svolta presso l'istituto di fisiologia dell'università di

Padova in cui ho potuto, assieme ad altri tesisti e dottorandi, mettere in pratica teorie, concetti e applicazioni studiati durante l'intero percorso universitario.

Prima di presentare i risultati dello studio effettuato a cui è stato dedicato l'ultimo capitolo dell'elaborato, sono state definite l'anatomia e la fisiologia del quadricipite femorale ponendo particolare attenzione ai meccanismi di contrazione e alle relazioni che intercorrono tra lunghezza e forza muscolare e tra quest'ultima e la velocità con cui si va a contrarre il muscolo.

Successivamente, l'elaborato presenta quelle che sono le tipologie di allenamento con gli adattamenti che esse producono sul muscolo.

Sono state poi analizzate, tramite un'attività di ricerca, le differenze tra un gruppo di soggetti allenati con il pacco pesi e un gruppo allenato con un sovraccarico nella fase eccentrica del movimento e, per concludere, l'ultima parte della trattazione è dedicata alla presentazione dei risultati e di un possibile risvolto applicativo di tale metodica di lavoro.

CAPITOLO 1 – CENNI DI FISIOLOGIA MUSCOLARE

Il muscolo scheletrico è un tessuto molto eterogeneo: l'eterogeneità è una proprietà di tutti i muscoli e sembra essenziale per la loro funzione. I muscoli scheletrici rispondono a un'ampia gamma di richieste funzionali in ciascuna specie animale e sono ancora più diversi nelle diverse specie. La flessibilità funzionale che consente allo stesso muscolo di essere utilizzato per vari compiti, dal mantenimento della postura alle contrazioni submassimali ripetute e alle contrazioni massimali veloci e forti, trova le sue basi in un potente e accurato controllo nervoso e nella disponibilità in ciascun muscolo di numerosi tipi di fibre con caratteristiche funzionali distinte (come ad esempio il tempo di contrazione, la velocità massima di accorciamento, la resistenza alla fatica, ecc.).

1.1 Struttura del muscolo scheletrico

Il corpo umano è costruito sullo scheletro osseo. Il punto di connessione di due o più ossa costituisce un'articolazione, la cui struttura è stabilizzata tramite resistenti e flessibili fibre di tessuto connettivo, denominate legamenti. Alcuni di essi limitano il movimento a tal punto che l'articolazione è immobile, mentre altri consentono libertà di movimento. Esistono tre tipi di tessuto muscolare – liscio, cardiaco e scheletrico – ognuno con specifiche proprietà anatomiche e funzionali. Il muscolo cardiaco lo si ritrova solo nel cuore; possiede diverse proprietà in comune con il muscolo scheletrico: al microscopio entrambi appaiono striati, si contraggono e si raccorciano con lo stesso meccanismo. Il muscolo liscio non ha l'aspetto striato ma condivide con il muscolo cardiaco la possibilità di essere attivato involontariamente e di autoregolazione intrinseca. Lo scheletro è ricoperto da oltre 600 muscoli scheletrici, equivalenti a circa il 40% del peso corporeo totale, fissati alle ossa tramite aponeurosi, fasce o tendini. Le aponeurosi sono lamine di tessuto connettivo denso, le fasce sono costituite da connettivo e si dividono in fascia superficiale, che giace sotto la cute e ne permette il libero movimento, e profonda, che circonda,

avvolge, separa e fornisce inserzioni per i muscoli. I tendini, invece, sono bande fibrose costituite da collagene, più resistente, ed elastina, sostanza più elastica, che collegano i muscoli alle ossa. Hanno una grande resistenza alla tensione.

Ciascun muscolo scheletrico è composto da centinaia a migliaia di singole cellule, allungate e multinucleate chiamate fibre. All'interno delle singole fibre, circondate da una membrana definita endomisio, le proteine contrattili miosina e actina sono incorporate rispettivamente in filamenti spessi e sottili, che sono disposti in modelli di bande ripetuti longitudinalmente chiamati sarcomeri. Essi rappresentano l'unità funzionale contrattile della fibra muscolare e la loro lunghezza, quindi il numero di sarcomeri in serie, condiziona le proprietà funzionali del muscolo. Più sarcomeri insieme formano le miofibrille, contenute in gran numero all'interno di ciascuna fibra muscolare (fig.1). La loro presenza determina il caratteristico aspetto striato. Le striature percorrono trasversalmente la fibra muscolare determinando un'alternanza di bande chiare e scure lungo l'asse longitudinale della fibra muscolare. Le due bande presentano un'ulteriore serie di striature, orientate perpendicolarmente all'asse longitudinale della miofibrilla. La banda più chiara (come mostrato in figura 1.1) è denominata *banda I* mentre quella più scura *banda A*. Le linee Z, poste a metà della banda I e contenenti i sarcomeri, sono adese al sarcolemma e hanno la funzione di stabilizzare l'intera struttura.

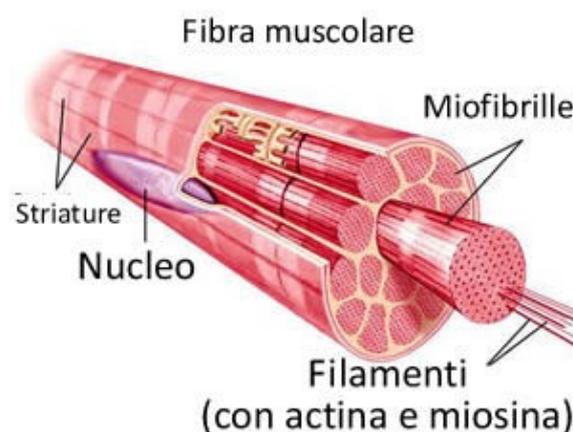


Figura 1 – struttura della fibra muscolare, tratta dal web

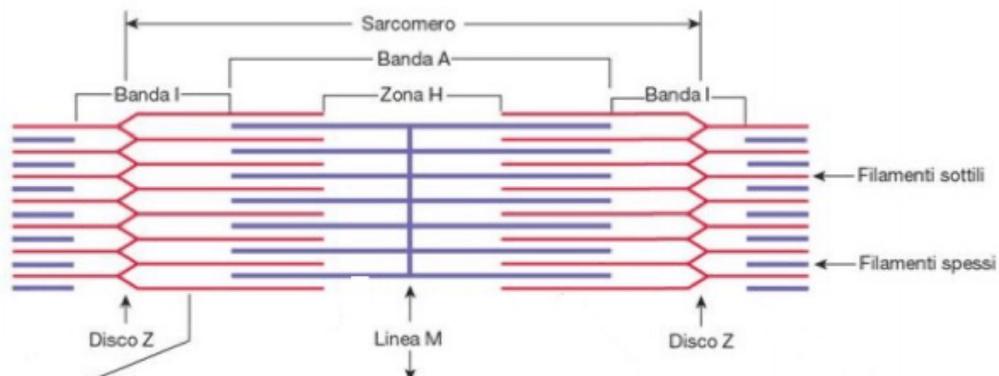


Figura 1.1 – Struttura del sarcomero, tratta dal web

Nei mammiferi, il numero di fibre in un dato muscolo è determinato alla nascita e cambia poco nel corso della vita, tranne in caso di lesioni o malattie. Al contrario, il numero di miofibrille e, di conseguenza, l'area della sezione trasversale delle fibre muscolari (CSA), può cambiare drasticamente, aumentando con la crescita normale o con l'ipertrofia indotta dall'allenamento e diminuendo con l'atrofia associata a immobilizzazione, inattività, lesioni, malattie o vecchiaia. Il cambiamento nella lunghezza dei singoli sarcomeri si verifica quando i filamenti spessi e sottili scivolano l'uno sull'altro, mediato dalle interazioni cicliche tra le proiezioni dei filamenti spessi della miosina.

Una particolarità della fibra muscolare è che ne sono stati messi in evidenza vari tipi:

- Le fibre rosse, di tipo I o lente, sono molto efficienti e resistenti alla fatica, forniscono energia per un tempo prolungato grazie allo sfruttamento del metabolismo aerobico. Tuttavia soffrono di un potenziale limitato quando si tratta di sviluppare la forza rapida e, per questo motivo, hanno una bassa attività ATPasica e un'elevata potenza aerobica e vengono dunque utilizzate nel lavoro muscolare di bassa intensità.
- Le fibre bianche, di tipo II o veloci, entrano in azione nelle sollecitazioni muscolari intense, sono caratterizzate

dall'espressione rapida della forza, da un'elevata attività ATPasica e da un'ottima potenza anaerobica.

- Si differenziano in fibre veloci di tipo IIa, dotate di un migliore metabolismo aerobico e glicolitico-ossidativo e di un maggior numero di capillari, e IIx, con un metabolismo interamente dipendente dal glicogeno, un minor numero di capillari ma una maggiore resistenza alla fatica.

Le fibre muscolari quindi sono molto eterogenee nelle loro proprietà funzionali e strutturali. Questa eterogeneità copre tutti gli aspetti della funzione contrattile muscolare ed è diretta all'ottimizzazione delle risposte contrattili e all'esecuzione di diversi compiti motori riducendo al minimo l'affaticamento.

1.2 Architettura muscolare

La struttura macroscopica del muscolo contribuisce a determinarne l'azione e incide sul modo in cui esso risponde all'allungamento. A seconda della disposizione delle fibre muscolari rispetto alla direzione della trazione, si possono distinguere:

- muscoli fusiformi, nei quali le fibre sono disposte in modo parallelo alla linea che va dall'origine all'inserzione come nel bicipite brachiale;
- muscoli pennati, dove i fascicoli formano un angolo obliquo con il tendine ed esercitano una trazione obliqua. La linea d'azione del muscolo dunque non coincide con la linea d'azione delle fibre. La loro importante caratteristica è l'angolo di pennazione, ovvero l'angolo compreso tra l'asse del muscolo e l'asse delle sue fibre. Hanno una lunghezza inferiore e possono sviluppare una contrazione limitata, ma nonostante ciò la pennazione permette di compattare un gran numero di fibre in un'area minore. Questo si traduce con il reclutamento di un maggior numero di fibre generando così una forza notevole e superiore rispetto ai muscoli a fibre parallele.

1.3 Proprietà del muscolo

Il tessuto muscolare è altamente specializzato e presenta quattro principali proprietà funzionali: contrattilità, eccitabilità, estensibilità ed elasticità:

- la contrattilità è la capacità del tessuto muscolare di accorciarsi esercitando una forza traente;
- l'eccitabilità è la capacità di rispondere ad uno stimolo elettrico;
- l'estensibilità è la capacità del muscolo di allungarsi oltre la normale lunghezza di riposo.
- L'elasticità è la capacità del tessuto muscolare di ritornare alla sua lunghezza originaria dopo che si è allungato.

1.4 Il meccanismo della contrazione muscolare

La contrazione muscolare coincide con una serie meccanica di eventi governati dal sistema nervoso centrale (SNC) . Da esso si dipartono i motoneuroni che arrivano al muscolo scheletrico rilasciando acetilcolina in seguito all'arrivo del potenziale d'azione; a sua volta, l'acetilcolina produce eccitazione e contrazione delle cellule muscolari innervate. Ogni fibra muscolare è innervata da una e una sola fibra nervosa mentre un motoneurone può innervare più fibre muscolari. Il numero di fibre muscolari innervate da un motoneurone è chiamato rapporto di innervazione e cambia da muscolo a muscolo a seconda del tipo della funzionalità che gli stessi hanno. Ne consegue che muscoli più piccoli adibiti alla realizzazione di movimenti fini e precisi avranno un basso rapporto d'innervazione, mentre sarà l'opposto per i muscoli più grandi. Il motoneurone assieme alle fibre muscolari da esso innervate costituisce un'unità motoria. Sebbene al suo interno tutte le fibre rispondono alla stimolazione nervosa, ciò non significa che durante una contrazione muscolare vengano attivate tutte le singole unità motorie. Il numero di unità motorie coinvolte nel processo di contrazione dipende dal carico imposto al muscolo, che influenza direttamente anche la forza che viene prodotta. Un carico leggero, ad esempio, recluta soltanto un numero limitato di unità motorie e quindi la forza di contrazione risulta bassa; al

contrario, carichi estremamente alti agiscono su tutte le unità, provocando così il massimo livello di forza.

La contrazione muscolare può essere sintetizzata in 5 fasi :

- la prima fase parte dalla fine di una precedente contrazione, in cui l'ATP che si lega alla testa della miosina porta al distacco di quest'ultima dalla molecola di actina;
- l'ATP viene idrolizzato ad ADP+fosfato inorganico (Pi) dall'azione della miosina. Il complesso ADP-Pi legato alla testa della miosina però non può ancora legarsi all'actina perchè a quest'ultima è legata la troponina I e di conseguenza la tropomiosina copre i siti di legame (situazione di riposo);
- con l'arrivo dell'impulso gli ioni calcio si legano a un'altra sostanza, la troponina C, che di conseguenza sposta lateralmente la tropomiosina, liberando così i siti di legame per l'actina. L'energia liberata dall'idrolisi dell'ATP induce una rotazione della testa della miosina che, caricandosi di energia potenziale, si lega debolmente ad una molecola di actina andando a formare un angolo di 90° (ponte trasversale);
- Il rilascio del fosfato inorganico dal legame ADP-Pi provoca un cambiamento nella testa della miosina, si piega a 45°, generando il cosiddetto colpo di frusta, che andrà a tirare il filamento di actina verso il centro del sarcomero (linea M). Inizia la generazione di forza;
- la testa della miosina rilascia anche la molecola di ADP e rimane strettamente ancorata all'actina, continuando a generare forza. La miosina quindi lega l'ATP, ma essendoci poca energia nel complesso actina-miosina-ATP, si stacca rapidamente ritornando alla posizione di partenza di 90°. Si ha la cessazione della generazione di forza. L'attività ATPasica della miosina permette di generare un nuovo ciclo.

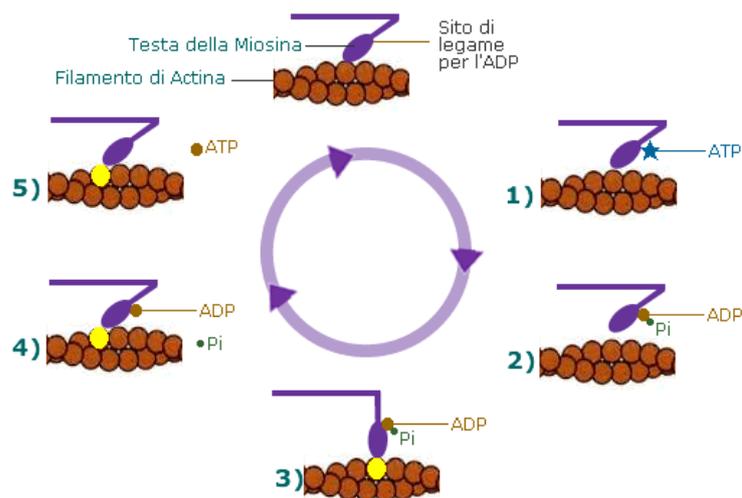


Figura 1.2 – ciclo dei ponti trasversali, tratta dal web

Un singolo ciclo eccitazione-contrazione è definito scossa muscolare. La forza generata dalla contrazione aumenta quando aumenta la frequenza dei potenziali d'azione. Quando gli intervalli fra le singole contrazioni sono lunghi la fibra ha la possibilità di rilassarsi.

1.4.1 Tipologie di contrazione muscolare

Si distinguono tre diverse tipologie di contrazione muscolare: isotonica, isometrica e auxotonica. Secondo il tipo di tensione muscolare che si produce, abbiamo un comportamento differente di accorciamento, contrazione o di allungamento degli elementi interessati, siano essi contrattili o elastici.

- Una contrazione si definisce *isometrica* quando la forza del muscolo viene esercitata contro una resistenza fissa o è pari a quella di una resistenza esterna, con la conseguenza di non realizzare un movimento nonostante la tensione che si sviluppa sia massima. Si svilupperà la forza massima volontaria in quanto vengono reclutate il massimo numero di fibre possibile che però non corrisponde alla totalità delle fibre presenti nel muscolo; infatti la massima forza possibile si svilupperà solo quando il muscolo viene allungato in quanto ciò determina un reclutamento totale delle fibre.

- Nella contrazione *isotonica*, o *dinamica*, gli elementi contrattili del muscolo si contraggono, quelli elastici invece non cambiano di lunghezza. Si produce quindi una variazione di lunghezza del muscolo. Le contrazioni dinamiche si dividono in concentriche ed eccentriche. In un'azione concentrica, i muscoli creano tensione e si accorciano, generando il movimento di un'articolazione; in un'azione eccentrica, i muscoli sviluppano una forza minore rispetto alla resistenza esterna e di conseguenza si allungano. Essa può essere fino al 40% superiore rispetto alla concentrica. I due tipi di contrazione coinvolgono diversi meccanismi di generazione di forza a livello di proteine contrattili; questo costituisce uno dei motivi principali della maggiore produzione di forza durante l'allungamento attivo rispetto all'accorciamento. Esistono inoltre differenze fondamentali tra le contrazioni eccentriche e concentriche in termini di costo energetico. Le prime osservazioni di Bigland Ritchie e Woods hanno mostrato che a parità di velocità di movimento, il costo energetico del lavoro positivo (accorciamento) è circa sei volte maggiore di quello del lavoro negativo (allungamento). Pertanto, le contrazioni eccentriche sono state sostenute come particolarmente adatte per il recupero della massa muscolare e della forza nelle popolazioni anziane e cliniche.
- La contrazione *auxotonica* rappresenta una combinazione tra sollecitazione isometrica e isotonica in cui la resistenza da vincere aumenta progressivamente.

1.5 Muscoli come leve

Le leve sono macchine semplici costituite da un'asta rigida che può ruotare intorno a un punto fisso detto fulcro. Questi dispositivi (leve, carrucole, verricelli) servono per equilibrare o vincere una forza (detta resistenza) applicando un'altra forza di intensità o direzione diversa (detta potenza). La distanza tra il fulcro e il punto in cui si applica la resistenza viene detto braccio della resistenza (bR). La distanza tra il fulcro e il punto

in cui si applica la potenza viene detto braccio della potenza (bP). L'uso di una macchina è tanto più conveniente quanto più piccola è la potenza da applicare rispetto alla resistenza.

Nel corpo umano il fulcro (F) è rappresentato dall'articolazione interessata, la Potenza (P) è rappresentata dalla forza che viene applicata per fare un movimento (di solito essa è applicata nell'inserzione muscolare); la Resistenza (R) è la forza alla quale ci opponiamo (un peso, lo spostamento di un segmento corporeo, la gravità, ecc.) nel momento in cui facciamo un movimento ed è applicata nel punto in cui viene generata la resistenza stessa. Si possono distinguere, come mostrato in fig. 1.3, tre tipi di leve:

- Leva di 1° genere, sempre svantaggiosa in quanto il braccio della potenza è minore del braccio della resistenza. Un esempio nel corpo umano è dato dall'articolazione di appoggio del capo atlanto-occipitale;
- Leva di 2° genere, sempre vantaggiosa perché il braccio della potenza è maggiore del braccio della resistenza. Ne è un esempio la flessione plantare del piede dalla stazione eretta;
- Leva di 3° genere, che può essere svantaggiosa o vantaggiosa a seconda del rapporto tra braccio della potenza e braccio della resistenza. Un esempio è dato dall'articolazione del gomito con la flessione dell'avambraccio sul braccio, in questo caso svantaggiosa.

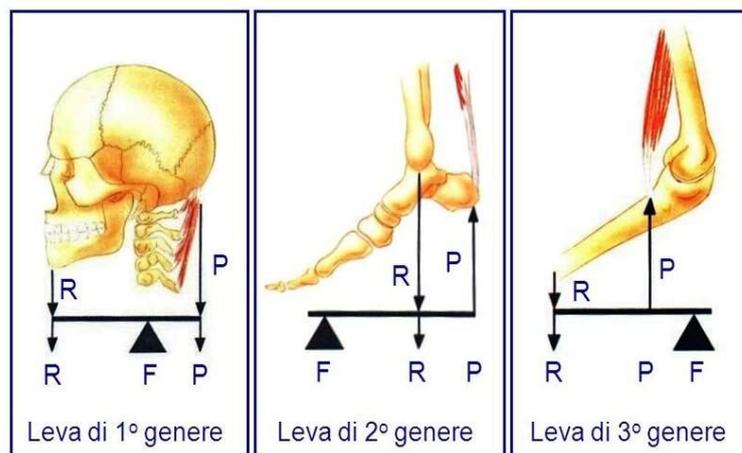


Figura 1.3 – leve nel corpo umano, tratta dal web

1.6 Relazione forza-lunghezza

La tensione e quindi la forza sviluppata dal muscolo è funzione della lunghezza del sarcomero. In condizioni normali la lunghezza a riposo dei muscoli scheletrici garantisce che essi si trovino alla lunghezza ottimale all'inizio della contrazione. La tensione è divisibile in due componenti la cui sommazione dà origine alla tensione totale:

- tensione passiva, che si sviluppa durante l'allungamento del muscolo. È funzione della lunghezza e dipende dalle componenti elastiche del muscolo (tessuto connettivo, titina);
- tensione attiva, che si sviluppa durante la contrazione del muscolo.

La tensione passiva prodotta si incrementa rispetto alla lunghezza a riposo come mostrato in fig.1.4. La tensione attiva è massima a riposo e decresce sia con l'allungamento sia con l'accorciamento.

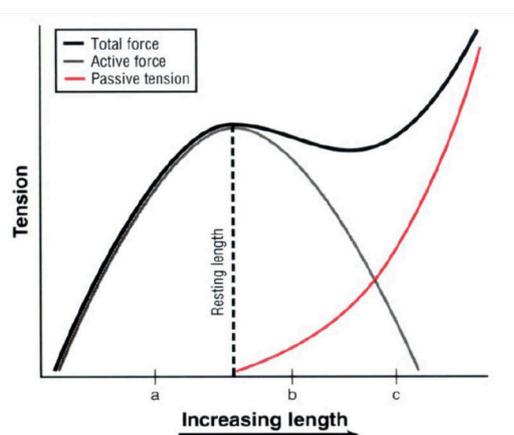


Figura 1.4 – curva tensione-lunghezza muscolare, tratta dal web

Nel 1938 Hill, pioniere della fisiologia neuromuscolare applicata allo sport, studiò un modello matematico per descrivere la meccanica dei muscoli. Da tale modello si evince che, modificando la lunghezza di un sarcomero, da una condizione di massimo accorciamento a una di massimo allungamento, la forza di contrazione prodotta da una neurostimolazione (o da un'elettrostimolazione) segue un andamento parabolico (minimo alle lunghezze limite e massimo alle lunghezze intermedie), in perfetta

dipendenza con il grado di sovrapposizione dei filamenti miosinici e actinici.

1.7 Relazione forza-velocità

Descrive, tramite una curva, una relazione intrinseca che si crea quando un muscolo si accorcia (o allunga) in risposta ad un carico costante. La velocità misurata durante la fase di accorciamento o allungamento viene quindi messa in relazione alla forza che il muscolo oppone alla resistenza applicata. In una fibra muscolare che si contrae concentricamente, una maggiore velocità di accorciamento corrisponde a una minore produzione di forza. Viceversa, in una fibra muscolare che si contrae in modo eccentrico, più forza di trazione la estende, più veloce sarà il suo allungamento. All'aumentare della velocità, quindi, la relazione F-V mostra un calo repentino, con andamento iperbolico, della forza (fig.1.5). Due ragioni spiegano tale andamento:

- i ponti acto-miosinici si susseguono così rapidamente da provocare una riduzione del loro tempo di permanenza e del loro contributo di forza;
- le forti correnti ioniche che scorrono nel sarcomero, durante uno stimolo contrattile massimale, rendono turbolenti i moti convettivi del plasma al suo interno, incrementandone la viscosità e l'azione di frizionamento diretta sui protofilamenti in scorrimento.

L'azione di accorciamento (concentrica) diventa un'azione di allungamento (eccentrica) quando il carico esterno eccede la massima forza isometrica del muscolo (indicata dal punto 0 nell'asse orizzontale del grafico). Per contrastare un'azione concentrica del muscolo, sono necessarie azioni eccentriche rapide in grado di generare forze di entità maggiore. Questo può spiegare l'insorgenza di danni muscolari e dell'indolenzimento ritardato che accompagna allenamenti di tipo eccentrico.

Il modello matematico rappresentativo della relazione F-V fu delineato per la prima volta nel 1935 dai due fisiologi americani WO Fenn e BS Marsh e perfezionato tre anni dopo da Hill. I risultati delle ricerche dimostrano

come un muscolo in allungamento produca una forza ben oltre quella necessaria a mantenere fermo un carico massimale. Attraverso la curva di Hill, inoltre, possiamo evidenziare il punto in cui il muscolo sviluppa la massima potenza, elemento questo che nella pratica sportiva si traduce nella giusta determinazione dei carichi adeguati con cui sviluppare le ottimali qualità dell'allenamento muscolare.

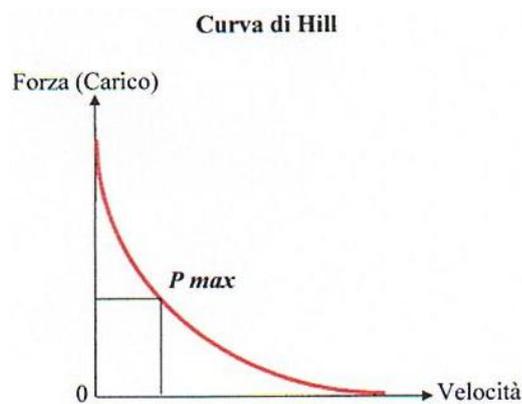


Figura 1.5 – curva forza-velocità, tratta dal web

Dal grafico si deduce che la massima potenza si genera quando il muscolo sposta un carico di circa il 40% del valore massimo ad una velocità di circa il 40% di quella massima possibile; di contro, la velocità massima è sviluppata dal muscolo quando esso è privo di carico aggiunto come avviene nella produzione di forza esplosiva, mentre la forza massima si raggiunge quando la velocità è nulla nonostante la tensione che si sviluppa nelle fibre sia massima, come avviene nella produzione di quella che comunemente viene chiamata forza isometrica massima; in questi casi la potenza sviluppata dal muscolo sarà minima.

L'allenamento con i sovraccarichi, attraverso le sue risposte meccanobiologiche, può rimodellare le proprietà meccaniche miofibrillari e alterare le relazioni F-L e F-V degli interi ventri muscolari. Per esempio, allenarsi eseguendo l'esercizio dello squat, avendo sulle spalle un bilanciere caricato con il 90% del massimo peso utilizzabile per una singola ripetizione, tende a sviluppare principalmente forza muscolare. Al contrario, svolgere un programma di salti con sovraccarichi, eseguendo

dei jump squat con un bilanciere carico al 30% della singola ripetizione massimale, aumenta la velocità di estensione degli arti inferiori.

1.8 RFD – Rate of Force Development

Il tasso di sviluppo della forza (RFD) è una misura della forza esplosiva, o semplicemente la velocità con cui un atleta può sviluppare la forza. Prima di andare nello specifico, vediamo cos'è la forza esplosiva: può essere definita come la capacità di aumentare la forza o la coppia il più velocemente possibile durante una rapida contrazione volontaria da un livello basso o di riposo (Maffiuletti et al. [2016](#)). La forza esplosiva, in particolare durante la prima fase di contrazione (0–50 ms), è molto variabile tra gli individui (Folland et al. [2014](#)). La ricerca ha dimostrato l'importanza di una rapida attivazione neuromuscolare per la forza esplosiva, in particolare durante la fase iniziale della contrazione (vale a dire nei primi 50 ms), ma si è scoperto che anche le proprietà contrattili intrinseche contribuiscono sempre più alla varianza spiegata lungo la curva forza-tempo crescente. In particolare: la forza di contrazione evocata spiegava fino al 40% della varianza nella forza esplosiva della fase iniziale (0–50 ms); la forza dell'ottetto evocato (un treno di otto impulsi sopramassimali a 300 Hz, che guida il muscolo al suo massimo tasso possibile di sviluppo della forza [RFD]) rappresentava il 68% della varianza durante la fase più veloce dello sviluppo della forza volontaria (RFD 50-100 ms); e la forza massima spiegava il 52–90% della varianza della forza esplosiva in fase avanzata (≥ 100). Tuttavia, queste misure della funzione contrattile (evocazioni di contrazione e ottetto e forza massima) rappresentano la somma di vari fattori muscolo-scheletrici, tra cui la dimensione del muscolo, l'angolo di pennazione e il momento del braccio, che preclude quindi conclusioni sull'importanza di questi fattori individuali specifici per la forza esplosiva.

In termini fisiologici, l'RFD rappresenta la velocità con cui gli elementi contrattili del muscolo possono sviluppare forza. Pertanto, il miglioramento

dell'RFD di un atleta può renderli più esplosivi poiché possono creare forze maggiori in un periodo di tempo più breve e quindi un atleta che può sviluppare un RFD maggiore può migliorare le proprie prestazioni sportive. Uno dei primi studi di Aagaard e colleghi (2002) ha dimostrato un aumento del 15% della RFD dopo 14 settimane di allenamento di forza pesante. Inoltre, ci sono stati aumenti sia dell'ampiezza dell'EMG che della velocità di aumento dell'EMG con l'allenamento, indicando un miglioramento della spinta neurale. Ciò suggerisce che l' RFD è correlato ad alterazioni della pulsione neurale. Altri fattori che contribuiscono all'RFD sono il tipo di fibra muscolare e il trasferimento di forza. Gli studi sul ruolo del tipo di fibra indicano che le fibre di tipo II mostrano una maggiore RFD; quindi, l'aumento della CSA in fibra di tipo II con l'allenamento della forza completerebbe l'aumento della spinta neurale.

Andando ad analizzare la curva forza-tempo (fig. 1.6), si può notare nella fase iniziale (attorno ai 50ms) una forza il cui livello dipende dall'abilità di reclutare volontariamente più unità motorie possibili (coordinazione intramuscolare) all'inizio del movimento. Seguono la forza esplosiva, spiegata precedentemente, la potenza, risultato della forza iniziale ed esplosiva e infine la forza massima, cioè il più alto livello di tensione che si riesce a generare in un gesto.

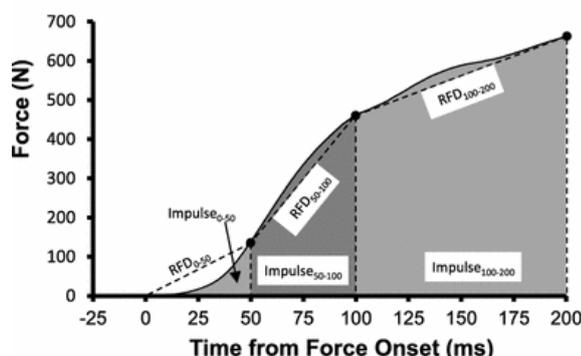


Figura 1.6 – curva forza-tempo (Folland et al., 2014)

1.9 Il quadricipite femorale

I muscoli della coscia sono muscoli estesi e voluminosi che dal bacino possono proiettarsi sul femore o sulla tibia. Si possono suddividere in quattro grandi famiglie: i muscoli anteriori, i muscoli posteriori, i muscoli mediali e quelli laterali aventi tutte funzioni anatomiche differenti e complementari tra loro. Da un punto di vista osseo e funzionale, si ancorano sulle ossa in numerosi punti la cui disposizione influenza strettamente le funzioni muscolari e il movimento articolare. Questi punti di ancoraggio si ritrovano essenzialmente sull'anca, sul femore e sulla tibia. Detto ciò, possiamo dire che i muscoli in questione possiedono capacità di muovere due articolazioni distinte: l'anca e il ginocchio. Suddividendo ulteriormente, sulla coscia individuiamo:

- muscoli flessori dell'anca ed estensori di ginocchio, localizzati anteriormente sulla coscia;
- muscoli estensori dell'anca e flessori di ginocchio, localizzati posteriormente sulla coscia;
- muscoli dell'esterno coscia, localizzati lateralmente sulla coscia;
- muscoli dell'interno coscia, localizzati medialmente sulla coscia.

La totalità di queste famiglie di muscoli determina molti movimenti dell'arto inferiore durante le attività di vita quotidiana come il cammino, la corsa, il rialzarsi dalla posizione seduta e il salire le scale.

Analizziamo nel particolare il quadricipite femorale. Tramite la sua contrazione è in grado di muovere la tibia raddrizzando la gamba, sia quando è staccata da terra sia quando il piede è ancorato al suolo. Come si può vedere dalla figura 1.7, il muscolo quadricipite si compone di 4 capi:

- il *retto del femore*, che origina dalla spina iliaca anteriore inferiore con un tendine diretto e dalla porzione più alta del contorno dell'acetabolo nonché dalla capsula dell'articolazione coxo-femorale;
- il *vasto mediale*, che origina dal labbro mediale della linea aspra e dalla linea rugosa che unisce questa al collo del femore;

- il *vasto laterale*, che origina dalla faccia laterale e dal margine anteriore del grande trocantere, dalla metà superiore del labbro laterale della linea aspra del femore e dal suo ramo che va al grande trocantere;
- il *vasto intermedio*, che è posto profondamente tra il vasto laterale e quello mediale, origina dal labbro laterale della linea aspra e dai 3/4 superiori delle facce anteriore e laterale del femore.



Vasto laterale Retto del femore Vasto intermedio Vasto mediale

Figura 1.7 – anatomia del muscolo quadricipite femorale, tratta dal web

CAPITOLO 2 - ADATTAMENTI INDOTTI DALL'ALLENAMENTO DELLA FORZA

2.1 Ipertrofia e aumento di forza

Un allenamento sistematico della forza comporta cambiamenti strutturali e funzionali del corpo, chiamati adattamenti morfo-funzionali. Il livello di adattamento si concretizza nelle dimensioni e nella forza dei muscoli. Il grado di questi adattamenti è direttamente proporzionale alle richieste poste all'organismo attraverso il volume, la frequenza e l'intensità dell'allenamento praticato, nonché alla capacità del corpo di tollerare tali richieste.

L'allenamento di forza porta ad un incremento, oltre che della forza, anche della potenza muscolare, della sezione trasversa del muscolo(CSA) e alterazioni della rigidità del tessuto connettivo tendineo (Hughes DC, Ellefsen S, Baar K. Adaptations to Endurance and Strength Training. Cold Spring Harb Perspect Med. 2018). Il risultato sono rapidi incrementi di forza sperimentati dai soggetti nelle fasi in cui questi imparano gli esercizi, seguiti da progressioni più lente di crescita muscolare. L'allenamento di forza, classicamente, varia il carico esterno ed il volume per stimolare gli adattamenti neuromuscolari e l'aumento della CSA muscolare, con l'utilizzo di carichi tra la 1RM fino a 10RM e un volume da 4 a 12 ripetizioni. L'evidenza indica che una crescita muscolare significativa si verifica quando la maggior parte dei set di allenamento viene eseguita con circa 3-4 ripetizioni in riserva (con carichi da moderati a elevati). Inoltre, è stato stabilito che il volume di, definito come il numero totale di ripetizioni (ripetizioni x serie), insieme ai carichi utilizzati per un determinato esercizio, è l'elemento chiave dell'adattamento in termini di ipertrofia muscolare. Alcuni studi hanno osservato aumenti di forza muscolare e CSA dopo solo 2-4 settimane (fig. 2), la metà del tempo necessario per vedere adattamenti all'allenamento di resistenza. Questo aumento precoce della forza è probabilmente causato da adattamenti

neuromuscolari e del tessuto connettivo, mentre i primi aumenti delle dimensioni del CSA muscolare possono essere il risultato di edema.

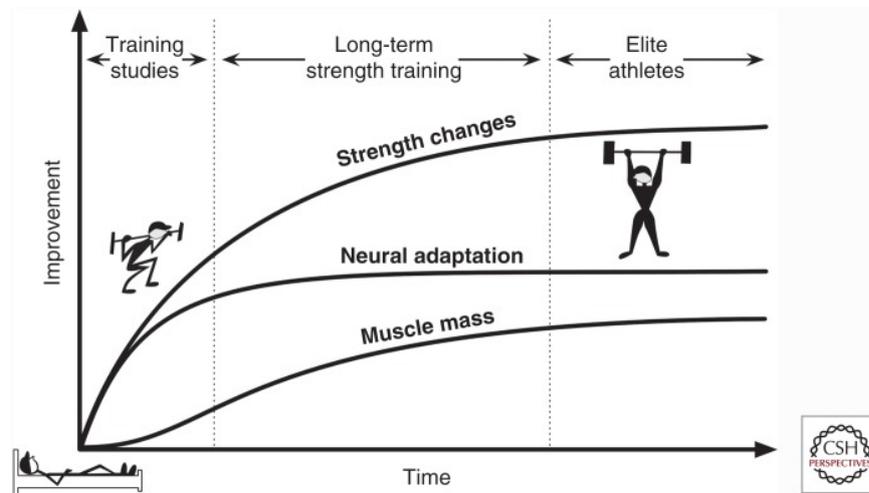


Figura 2 – adattamenti indotti dall'allenamento della forza (Hughes et al.2018)

È possibile vedere dal grafico soprastante le alterazioni di forza, massa e gli adattamenti neurali con esercizi di resistenza nel tempo. Gli studi sugli esercizi di resistenza (da 8 a 12 settimane di allenamento) mostrano un aumento precoce della forza come risultato degli adattamenti neurali. Con un allenamento di forza prolungato, la massa muscolare aumenta lentamente e guida i successivi cambiamenti di forza dopo che gli adattamenti neurali iniziano a stabilizzarsi. Infine, a livello d'élite, gli individui mostrano piccoli cambiamenti in tutti e tre gli adattamenti fondamentali che accompagnano l'allenamento della forza. A questo punto, sono necessari nuovi stimoli per aumentare la forza. Gli adattamenti osservati all'interno del sistema neuromuscolare si sono concentrati sull'aumento dell'acquisizione di abilità attraverso il sistema nervoso e sull'aumento dell'attivazione muscolare massima attraverso la sincronizzazione delle unità motorie, il reclutamento muscolare e l'aumento dell'attivazione neurale. In termini di ipertrofia, il principale risultato dell'adattamento è stato l'aumento della CSA per le singole fibre muscolari, tramite l'aggiunta dei sarcomeri in parallelo. Per quanto riguarda, invece, l'aspetto ormonale, i primi studi meccanicistici si sono

concentrati sulle alterazioni all'interno dell'ambiente ormonale dopo un esercizio di resistenza acuta come potenziale fattore che contribuisce all'ipertrofia. Tuttavia, prove recenti sembrano mettere in dubbio l'ipotesi che gli ormoni contribuiscano all'ipertrofia e alla crescita muscolare indotte dall'esercizio.

2.2 Eccentric overload

Un efficace allenamento orientato all'ipertrofia dovrebbe comprendere una combinazione di tensione meccanica, danno muscolare e stress metabolico (Krzysztofik M, Wilk M, Wojdała G, Gołaś A. Maximizing Muscle Hypertrophy: A Systematic Review of Advanced Resistance Training Techniques and Methods. Int J Environ Res Public Health. 2019).

L'uso di carichi elevati durante la fase eccentrica del movimento è associato alla tensione meccanica e a un significativo danno muscolare indotto dall'esercizio. Quando la forza applicata a un muscolo supera la forza prodotta, il muscolo si allungherà, assorbendo energia meccanica. Queste contrazioni eccentriche sono caratterizzate da un'elevata produzione di forza; in particolare il muscolo scheletrico è in grado di produrre fino al 50% in più di forza durante le contrazioni eccentriche massime rispetto alle contrazioni concentriche. Il carico eccentrico accentuato (AEL) prescrive un'entità del carico della fase eccentrica superiore a quello utilizzato nella concentrica utilizzando movimenti che richiedono azioni eccentriche e concentriche accoppiate, con un'interruzione minima della meccanica naturale.

L'AEL sembra essere più vantaggioso per gli adattamenti della forza quando la differenza relativa in percentuale di 1RM tra il sovraccarico ECC e il carico CON è maggiore. Nello specifico quando la differenza tra i carichi ECC e CON è maggiore del 30% 1RM (Suchomel TJ, Wagle JP, Douglas J, Taber CB, Harden M, Haff GG, Stone MH. Implementing Eccentric Resistance Training-Part 2: Practical Recommendations. J Funct Morphol Kinesiol. 2019). Inoltre, questa metodica di allenamento ha anche applicazioni nelle fasi finali di un piano periodico per atleti di forza-

potenza: il sovraccarico dell'ECC può aumentare l'RFD e fornire una situazione meccanicamente favorevole affinché l'atleta possa sperimentare il potenziamento della fase CON. Allenandosi con un'elevata potenza e velocità di movimento, l'atleta può aspettarsi di sperimentare un maggiore sviluppo nella produzione di energia a lungo termine.

CAPITOLO 3 - ELETTROSTIMOLAZIONE, ITT

La contrazione muscolare è il risultato di un'eccitazione cellulare trasmessa al muscolo dal sistema nervoso centrale tramite le proprie fibre nervose per mezzo di impulsi elettrochimici. La stimolazione elettrica è in grado di indurre una contrazione sostituendosi agli impulsi organici, determinando dei potenziali d'azione a livello delle cellule eccitabili (nervose o muscolari), grazie all'utilizzo di una corrente elettrica prodotta autonomamente da un generatore. La zona del sistema nervoso in cui è applicata la corrente viene detta placca motrice o giunzione neuromuscolare: si tratta di un'espansione discoide dove una fibra nervosa mielinica motoria raggiunge una fibra muscolare scheletrica. Tale zona, oltre ad essere un punto di facile reperimento anatomico, soprattutto a livello dei punti motori (le proiezioni sulla pelle della placca motrice), è priva di rivestimento mielinico, che ostacolerebbe, con la sua naturale funzione isolante, un agevole passaggio della corrente alla fibra nervosa. La stimolazione indotta elettricamente agisce direttamente a livello periferico e la conseguente contrazione muscolare non è mediata dal sistema nervoso centrale.

L'attivazione volontaria (VA), ovvero la misura della spinta neurale verso un muscolo durante una contrazione volontaria, viene misurata applicando la stimolazione elettrica sovramassimale a un muscolo durante una contrazione volontaria massima (MVC) (Olsen S et al. 2021). La tecnica della contrazione interpolata (ITT) sviluppata da Merton (1954) è

considerata il gold standard per valutare in modo non invasivo la capacità di attivare al massimo le unità motorie in popolazioni sane e cliniche; consiste nella stimolazione elettrica (o magnetica) di un tronco nervoso o di rami terminali assonali durante una contrazione volontaria massima. Un aumento della forza suscitata dalla stimolazione sovrapposta evidenzia un deficit nell'attivazione volontaria. In quanto tale, l'ITT è il metodo più comunemente utilizzato per valutare le alterazioni centrali (neurali), ma può essere utilizzato anche il metodo del rapporto di attivazione centrale (CAR). Entrambi implicano l'applicazione di una stimolazione elettrica sovramassimale al nervo motorio o al muscolo mentre il muscolo bersaglio esegue una MVC. Se il muscolo non è già attivato al massimo, questa stimolazione produrrà ulteriore forza muscolare (contrazione interpolata).

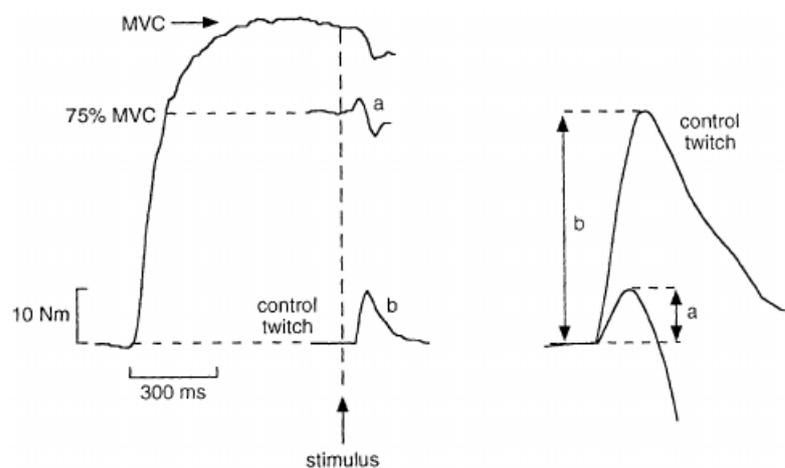


Figura 3 – esempio di calcolo dell'attivazione volontaria. (Gabrielle M. Allen, S. C. Gandevia and J. Middleton)

Dall'immagine 3 si può notare come durante un tentativo di sforzo volontario massimo, uno stimolo elettrico sovramassimale viene erogato sul muscolo al picco di forza (grafico di sinistra). Se il livello di pulsione volontaria è massimo, lo stimolo non provoca alcun incremento di forza. Tuttavia, se la pulsione volontaria è submassimale (es. 75% MVC) quando viene erogato lo stesso stimolo, viene evocato un piccolo incremento di forza (a). Questa forza evocata è espressa come una frazione della risposta evocata dallo stesso stimolo nel muscolo rilassato (b). Questa

frazione viene sottratta da 1 e moltiplicata per 100 per ottenere una percentuale di attivazione volontaria.

Il calcolo dell'ITT (interpolated twitch technique) implica l'espressione della contrazione interpolata come proporzione della forza di contrazione prodotta quando la stessa stimolazione viene applicata al muscolo a riposo. Il metodo CAR consiste, invece, nell'esprimere l'ampiezza dell'MVC appena prima della contrazione interpolata come proporzione della forza totale prodotta dall'MVC più la contrazione interpolata. In generale, il metodo ITT viene impiegato quando viene utilizzato un impulso singolo o doppio, mentre il metodo CAR viene impiegato quando viene utilizzato un treno di stimolazione.

Una limitazione nell'utilizzo del metodo ITT è stata registrata da uno studio dove sono stati evidenziati perdita di forza e di attivazione del quadricipite durante la ricezione o l'attesa di uno stimolo interpolato (IT) durante una MVC. Esse sono diminuite rispettivamente del 9,5% e del 14,9% quando i soggetti sapevano di ricevere un IT durante un MVC. L'aspettativa di uno stimolo elettrico nocivo ha portato a un calo della forza e dell'attivazione. Numerosi studi hanno identificato che la massima tolleranza al dolore da stimoli elettrici si verifica dal 36% al 55% di una MVC del quadricipite. Pertanto, la riduzione di forza e dell'attività EMG potrebbero aver significato una diminuzione conscia o subconscia della spinta neurale del sistema nervoso centrale. La maggior parte degli studi implementa una sessione di orientamento prima della sperimentazione e il presente studio dimostra che una singola sessione di orientamento (7 MVC con 3 ITT) non è sufficiente per prevenire decrementi di prestazioni associati all'aspettativa di uno stimolo elettrico. In sintesi, quindi, la validità dell'ITT per la stima della piena attivazione muscolare deve essere considerata con cautela, poiché l'aspettativa di un IT può inibire la capacità dell'individuo di esercitare la massima forza, specialmente con partecipanti inesperti. (Button DC, Behm DG. The effect of stimulus anticipation on the interpolated twitch technique. J Sports Sci Med. 2008).Le metodologie

dovrebbero consentire un adeguato periodo di orientamento per diminuire l'ansia verso lo stimolo elettrico.

CAPITOLO 4 – SCOPO DELLO STUDIO

L'obiettivo del seguente studio è quello di indagare gli adattamenti funzionali al muscolo quadricipite femorale in risposta a un programma di allenamento di forza con o senza sovraccarico eccentrico. I tipi di allenamento ECC+ e CONV sono stati confrontati per valutare se ci fossero differenze nel cambiamento in termini di dimensioni del quadricipite, forza sviluppata nel tempo, reclutamento delle unità motorie e capacità di attivazione in base alla modalità di allenamento. La nostra ipotesi era che il muscolo sarebbe andato incontro a ipertrofia in entrambi i casi, ma in modo maggiore nel gruppo allenato con un sovraccarico nella fase eccentrica. Inoltre, ci aspettavamo un miglioramento nella velocità di produzione di forza da parte del quadricipite e nella capacità di attivazione; il tutto in misura maggiore nel gruppo ECC+.

CAPITOLO 5 – MATERIALI E METODI

5.1 Partecipanti

Per la realizzazione di questo studio sono stati reclutati 20 partecipanti: 10 giovani di controllo (5 maschi e 5 femmine) di età compresa tra i 18 e i 25 anni e 10 giovani di ricerca (5 maschi e 5 femmine) della stessa età. Queste popolazioni sono state reclutate dall'università di Padova. I partecipanti definiti come convenzionali (CONV) erano quegli individui che avrebbero poi eseguito un programma di allenamento tradizionale e che nella vita quotidiana erano moderatamente attivi, ovvero non eseguivano più di 3 allenamenti a settimana, non erano atleti professionisti e non

allenavano gli arti inferiori per più di 2 volte a settimana. I partecipanti appartenenti al gruppo di ricerca, definiti come ECC+, erano quegli individui che avrebbero poi eseguito un programma di allenamento con il sovraccarico nella fase eccentrica. Anch'essi moderatamente attivi come il gruppo di controllo. La divisione nei due gruppi è stata randomizzata tramite l'utilizzo di un software e non è stato comunicato ai soggetti il gruppo di appartenenza prima dell'inizio degli allenamenti.

Tutti i partecipanti hanno fornito il consenso informato scritto a questo studio, che è stato approvato dai Comitati Etici locali dell'Università di Padova.

I criteri di inclusione per entrambe le popolazioni erano:

- età compresa tra i 18 e i 35 anni
- assenza di infortuni muscolo scheletrici recenti o patologie croniche
- volontà e capacità di rispettare il protocollo

I criteri di esclusione si focalizzavano sull'eccessivo volume di allenamento settimanale, soprattutto se a carico di arti inferiori.

5.2 Study design

Nel periodo da aprile a giugno 2022 si è svolto il seguente progetto di ricerca presso il laboratorio di fisiologia dell'università di Padova.

Al fine di verificare gli adattamenti neuromuscolari all'allenamento con o senza sovraccarico eccentrico, i volontari sono stati valutati 2 volte, una nei giorni precedenti il primo allenamento e la seconda nei due/tre giorni seguenti l'ultimo allenamento. In ciascuna sessione di test sono stati valutati: (i) la componente morfologica, (ii) la componente funzionale e (iii) la componente neuronale. È stato rispettato nel mezzo un protocollo di allenamento di 4 settimane con una frequenza di 3 volte a settimana effettuando ciascuna sessione dopo almeno 24 ore dalla precedente per consentire il recupero muscolare.

Per ciascuna fase del test sono state eseguite alcune sedute di familiarizzazione e conoscenza delle diverse strumentazioni con gli

operatori per consentire l'esecuzione di protocolli standardizzati per ciascun partecipante. Durante la fase di analisi morfologica è stata eseguita un'ecografia a riposo al muscolo quadricipite femorale per vedere la sua architettura, la stiffness e la CSA. Le misurazioni sono state eseguite con il partecipante sdraiato supino su un lettino da esame, utilizzando un ecografo ed effettuando scansioni delle zone muscolari d'interesse. Ciascuna immagine ecografica è stata raccolta dallo stesso operatore.

La seconda fase, sulla quale si concentrerà la tesi, consisteva nella raccolta dei parametri funzionali di forza degli estensori del ginocchio (MVC) tramite l'utilizzo di un dinamometro collegato ad una cella di carico. Il partecipante, per l'esecuzione del test, è stato assicurato ad una sedia per impedire eventuali movimenti indesiderati e gli è stato chiesto di posizionare le mani sulla spalla controlaterale. Sono state registrate 3 contrazioni della durata di 4 secondi intervallate da 1 minuto di recupero e precedute da una prova submassimale e da 10 brevi contrazioni di riscaldamento. Un forte incoraggiamento verbale è stato fornito durante tutta la procedura di test MVC. L'uscita della cella di carico è stata alimentata in un sistema di acquisizione (BIOPAC MP100, Biopac INC, Santa Barbara, USA). La contrazione con il valore di forza più alto è stata considerata come il vero MVC.

L'angolo al ginocchio è stato fissato a 90° di flessione e il centro di rotazione dell'articolazione del ginocchio è stato allineato con l'asse di rotazione del dinamometro. Il braccio di leva, ovvero la distanza dalla testa del perone alla cinghia fissata poco sopra il malleolo laterale della caviglia, è stato mantenuto uguale sia per il test pre che per il test post allenamenti così da risultare standardizzato.

Durante le procedure MVC, i partecipanti hanno ricevuto una stimolazione elettrica erogata attraverso un dispositivo stimolatore (Digitimer DS7AH, Digitimer Ltd, Welwyn Garden, Hertfordshire, Regno Unito) tramite due elettrodi posizionati nella porzione distale della coscia, uno più centrale e

uno più laterale. La stimolazione consisteva in tre impulsi singoli sopramassimali:

- la prima stimolazione veniva data dopo che il partecipante aveva raggiunto il suo picco, o plateau, il più velocemente possibile;
- la seconda stimolazione dopo 2 secondi, quando il partecipante era ancora in fase di massima spinta;
- la terza, nonché ultima stimolazione, veniva data a riposo, 1 secondo dopo la contrazione. Questa va a osservare l'activation capacity (AC).

La corrente elettrica richiesta per la stimolazione sopramassimale di ciascun individuo è stata valutata prima del test. La corrente sovramassimale è stata acquisita monitorando l'uscita della forza durante una successione di stimoli con corrente crescente. Nel momento in cui non è stata osservata alcuna forza aggiuntiva per un ulteriore aumento della corrente, la corrente è stata registrata e utilizzata durante la valutazione.

5.3 Leg press Technogym

La macchina utilizzata per lo studio è un particolare tipo di leg press, la Technogym biostrength leg press, caratterizzata dall'assenza di un pacco pesi; la resistenza è data da un motore elettrico. Questa sua particolarità permette di poter eseguire diverse modalità di allenamento: la prima è quella isotonica, o tradizionale, che simula l'azione di un pacco pesi tradizionale quindi l'intera esecuzione del movimento sarà con un carico costante. La seconda modalità, l'eccentric plus, consente di aumentare il carico nella fase eccentrica del gesto, impostando la percentuale di incremento rispetto alla fase concentrica. Allo scopo dello studio è stato deciso di impostare un coefficiente di incremento pari a 1.5, il che sta a significare che nella fase eccentrica il carico aumenta del 150%.

A causa di una limitazione della macchina, la quale non riesce a superare i 260kg, è stato deciso di effettuare gli allenamenti dello studio in monopodalica.



Figura 5.3 – Leg press biostrength Technogym, tratta dal web

5.4 – Variabili considerate

5.4.1 - Volume di allenamento

Il programma di allenamento è stato applicato per 4 settimane, tre volte a settimana, con un intervallo minimo di 24 ore tra le sessioni. In ogni sessione di allenamento, i partecipanti assegnati al gruppo CONV hanno eseguito quattro (1° mesociclo: settimane 1–2-3) o cinque serie (2° mesociclo: settimana 4) di 10 contrazioni con un intervallo di riposo di 3 minuti tra le serie.

I partecipanti assegnati al gruppo ECC+ sono stati coinvolti in un programma di allenamento eccentrico della stessa durata e con lo stesso numero di serie ma con 8 ripetizioni anziché 10.

Un metronomo elettronico è stato utilizzato con entrambi i gruppi per mantenere una cadenza standard di 2 s per ciascuna fase del movimento. All'inizio di ciascuna settimana veniva calcolato l'1RM e reimpostato il carico allenante per quella settimana. L'1RM, ovvero il massimo carico

che può essere sollevato una sola volta senza alcun aiuto esterno, è stato stimato per via indiretta (tecnica che prevede una serie di prove che portano a calcolare indirettamente il carico massimo che l'atleta è in grado di sollevare). E' un test, dunque, sub massimale. È stata usata la formula di Brzycki (M. Brzycki, 1993):

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

In ciascuna seduta veniva eseguita una serie di squat a corpo libero come riscaldamento, seguita da una serie con un carico pari al 30% dell'1RM e una al 50% prima di iniziare le serie allenanti con un carico al 70% dell'1RM. Inoltre, è stato deciso di standardizzare la posizione mantenendo un angolo di 90° al ginocchio nella fase di partenza. Prima veniva eseguita la serie con la gamba destra e poi con la sinistra.

5.4.2 – Scala di Borg (RPE)

Con qualsiasi programma di allenamento, è importante disporre di un metodo semplice e affidabile per monitorare l'intensità dell'esercizio. Esistono diversi modi per monitorarla; i più comunemente usati sono la frequenza cardiaca e l'RPE. Le valutazioni delle scale di sforzo percepito, come quelle sviluppate da Borg, sono strumenti che vengono spesso utilizzati per monitorare e quantificare le percezioni individuali dello sforzo durante l'esercizio e sono usati nelle raccomandazioni sull'esercizio poiché l'RPE è positivamente correlato alla frequenza cardiaca. Diverse variazioni di queste scale hanno dimostrato di fornire stime valide e affidabili delle misure fisiologiche dello sforzo valutate durante l'esercizio in bambini e adulti sani (Penko AL, Barkley JE, Koop MM, Alberts JL. 2017). La validità delle scale RPE nelle popolazioni sane è stata stabilita principalmente valutando la relazione tra il punteggio RPE e le misure fisiologiche dello sforzo, come la frequenza cardiaca, durante un test da sforzo che

aumenta progressivamente il carico di lavoro. Gli aumenti lineari dell'RPE possono essere visti come aumenti del carico di lavoro.

La scala RPE ha un intervallo da 0 a 10 (dove 0 = senza sforzo e 10 = massimo sforzo). Ai fini dello studio, veniva somministrata la scala di Borg a ciascun soggetto al termine di ogni sessione.

0	NESSUNO SFORZO
1	ESTREMAMENTE LEGGERO
2	LEGGERO
3	DISCRETO
4	PIUTTOSTO INTENSO
5	INTENSO
6	
7	MOLTO INTENSO
8	
9	ESTREMAMENTE INTENSO
10	MASSIMO SFORZO

Figura 5.4.1 – Scala di Borg, tratta dal web

5.4.3 – Scala di Soreness

Un'altra variabile utilizzata, per monitorare il livello di dolore prima e al termine di ciascuna sessione di allenamento, è stata la scala di Soreness, corrispondente a una quantificazione numerica da 1 a 10 del dolore muscolare. Comprende categorie con ancore verbali associate ai seguenti numeri: 0 = nessun dolore, 1 = dolore debole, 2 = dolore lieve, 3 = dolore moderato, 4 = dolore piuttosto forte, 5 = dolore forte, 7 = dolore molto forte, 10 = dolore estremamente intenso (quasi insopportabile).

SORENESS SCALE	
0	Nessun dolore muscolare
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	Massimo dolore muscolare

Figura 5.4.2 – Scala di Soreness, tratta dal web

5.4.4 – Gpaq

Ultima, ma non meno importante, variabile considerata è stata la valutazione del livello di attività fisica tramite il questionario GPAQ, sviluppato nel 2002 dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) nell'ambito dell'approccio STEPwise dell'OMS alla sorveglianza dei fattori di rischio di malattie croniche per l'osservazione della physical activity. Il GPAQ consiste in 16 domande progettate per stimare il livello di PA di un individuo in 3 domini (lavoro, trasporti e tempo libero) e il tempo trascorso in SB. Per ciascun dominio è chiesto se viene fatta attività fisica di tipo moderato o intenso e se sì per quanti giorni alla settimana e per quanto tempo al giorno. I GPAQ, inoltre, richiedono al soggetto di stimare le ore passate seduti durante la giornata, misurando così anche il Sedentary Time.

CAPITOLO 6 – ANALISI DEI DATI

L'analisi statistica è stata effettuata con il software GraphPad Prism 9.4.1 che ha permesso di valutare i risultati significativi dal punto di vista statistico. È stata utilizzato il test ANOVA a due vie che rivela i risultati di due variabili indipendenti su una variabile dipendente; essa analizza l'effetto delle variabili indipendenti sul risultato atteso insieme alla loro relazione con il risultato stesso. In particolare, è stata utilizzata per confrontare i valori prima e dopo le 4 settimane di allenamento. Le interazioni significative tra i gruppi sono state individuate dal test Sidak post hoc. I valori delle differenze di base tra i gruppi CONV ed ECC+ sono stati testati statisticamente utilizzando un t-test indipendente. Parametro fondamentale nel t-test è il p-value; questo parametro è usato nei test di verifica d'ipotesi e indica la probabilità di conseguire un risultato uguale o più esterno rispetto a quello osservato, supposta come esatta l'ipotesi. Il valore α , usato come riferimento per decretare se è presente una significatività o meno, è pari a 0,05. Calcolato il p-value sono quindi possibili due casi:

- $p > \alpha$; in questo caso l'ipotesi non può essere ritenuta valida;
- $p < \alpha$; in questo caso vi è significatività, ossia l'ipotesi è confermata.

I dati non significativi sono riportati come n.s.

CAPITOLO 7 – RISULTATI

Per le contrazioni massime isometriche a 90° di flessione al ginocchio non abbiamo notato aumenti significativi in nessuno dei parametri misurati se non nella differenza di forza tra uomini e donne sia appartenenti al gruppo convenzionale sia al gruppo eccentrico.

Sono stati però evidenziati miglioramenti sulla ripetizione massima isometrica.

Di seguito sono riportate le tabelle e i grafici dei risultati ottenuti.

MVC

Dalla figura 7.1 si può notare come la massima contrazione volontaria rimane pressoché invariata in entrambi i gruppi, dimostrato anche da un p-value del 0.6 (molto superiore rispetto a quello accettato corrispondente a un valore non superiore a 0.05). Questo sta a significare che, con le condizioni sperimentali scelte, non sono stati evidenziati miglioramenti nella massima forza isometrica.

Šidák's mult	95.00% CI of diff.	Below threshold?	Summary	Adjusted P Value
Pre - Post				
CONV	-68.68 to 69.61	No	ns	0.9998
ECC+	-83.37 to 47.83	No	ns	0.7652
Test details	Predicted (LS) mean 2	Predicted (LS) mean diff.	SE of diff.	N1
Pre - Post				
CONV	704.8	0.4656	28.20	9
ECC+	801.4	-17.77	26.76	10

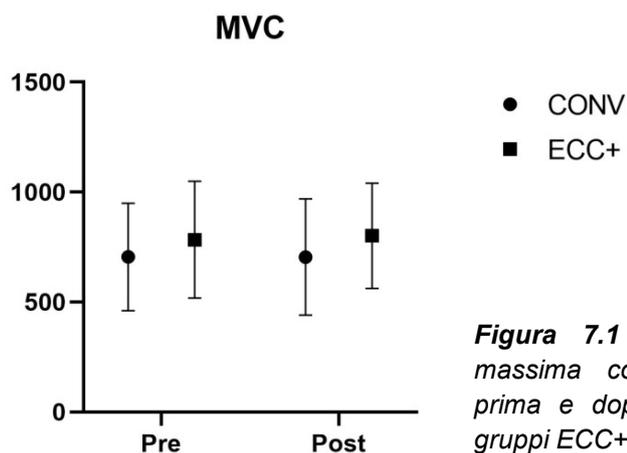


Figura 7.1 – Confronto della massima contrazione volontaria prima e dopo allenamento tra i gruppi ECC+ e CONV

Andando però a confrontare le differenze tra individui di sesso maschile e individui di sesso femminile, è possibile osservare, dalle figure 7.2 e 7.3, come la forza risulti maggiore nei soggetti di sesso maschile:

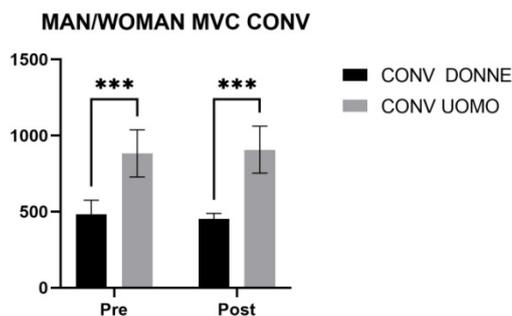


Figura 7.2 – Confronto, tra soggetti di sesso maschile e femminile appartenenti al gruppo CONV, della massima contrazione volontaria prima e dopo le 4 settimane di allenamento.

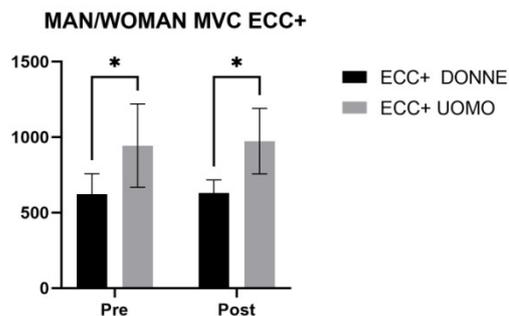


Figura 7.3 – Confronto, tra soggetti di sesso maschile e femminile appartenenti al gruppo ECC+, della massima contrazione volontaria prima e dopo le 4 settimane di allenamento.

Time to peak

Anche il time to peak risulta simile tra i due gruppi e tra l'inizio e la fine degli allenamenti, come si può notare dalla figura 7.2, con un p-value risultante pari a 0.7.

Šidák's multi	Predicted (LS) mean diff.	95.00% CI of diff.	Below threshold?	Summary	Adjusted P Value
Pre - Post					
CONV	16.33	-84.21 to 116.9	No	ns	0.9072
ECC+	-4.900	-100.3 to 90.48	No	ns	0.9902
Test details	Predicted (LS) mean 1	Predicted (LS) mean 2	Predicted (LS) mean diff.	SE of diff.	N1
Pre - Post					
CONV	184.6	168.2	16.33	41.01	9
ECC+	181.2	186.1	-4.900	38.90	10

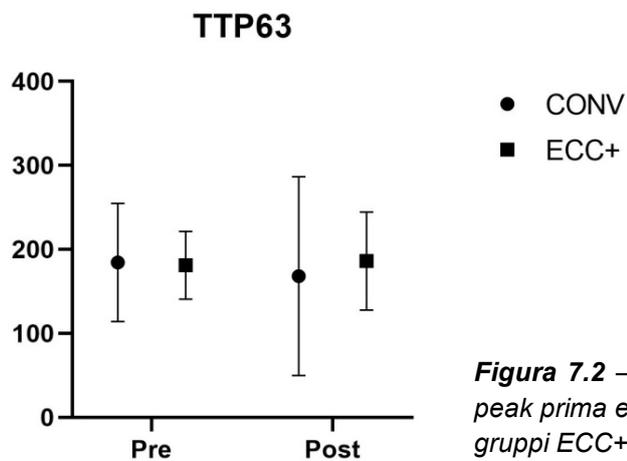


Figura 7.2 – Confronto del time to peak prima e dopo allenamento tra i gruppi ECC+ e CONV

Rate of force development

Dai grafici sotto riportati osserviamo come anche il rate of force development non sia significativamente cambiato a seguito delle 4 settimane di allenamento in nessun momento (a 50ms, 100ms, 150ms o 200ms), andando dunque a significare che questo periodo non è sufficiente ad aumentare la velocità con cui i soggetti riuscivano a sviluppare forza.

Šidák's mult	Predicted (LS) mean diff.	95.00% CI of diff.	Below threshold?	Summary	Adjusted P Value
Pre - Post					
CONV	-465.6	-1838 to 906.9	No	ns	0.6602
ECC+	152.4	-1150 to 1454	No	ns	0.9505
Test details	Predicted (LS) mean 1	Predicted (LS) mean 2	Predicted (LS) mean diff.	SE of diff.	N1
Pre - Post					
CONV	1382	1848	-465.6	559.8	9
ECC+	1209	1056	152.4	531.1	10

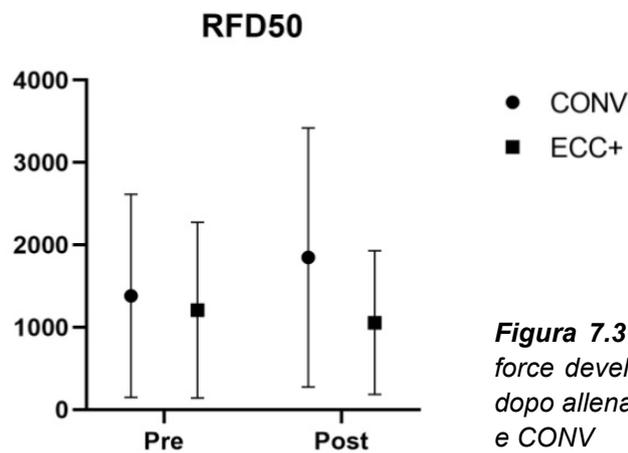


Figura 7.3 – Confronto del rate of force development a 50ms prima e dopo allenamento tra i gruppi ECC+ e CONV

Šidák's multi	Predicted (LS) mean diff.	95.00% CI of diff.	Below threshold?	Summary	Adjusted P Value
Pre - Post					
CONV	-389.0	-2299 to 1521	No	ns	0.8585
ECC+	53.27	-1758 to 1865	No	ns	0.9968
Test details	Predicted (LS) mean 1	Predicted (LS) mean 2	Predicted (LS) mean diff.	SE of diff.	N1
Pre - Post					
CONV	2477	2866	-389.0	778.8	9
ECC+	2483	2430	53.27	738.9	10

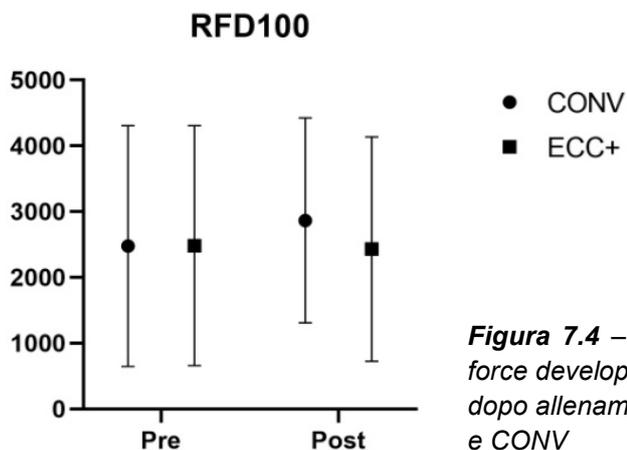


Figura 7.4 – Confronto del rate of force development a 100ms prima e dopo allenamento tra i gruppi ECC+ e CONV

Šidák's multi	Predicted (LS) mean diff	95.00% CI of diff.	Below threshold?	Summary	Adjusted P Value
Pre - Post					
CONV	-307.2	-1854 to 1239	No	ns	0.8649
ECC+	-109.3	-1576 to 1358	No	ns	0.9796
Test details	Predicted (LS) mean 1	Predicted (LS) mean 2	Predicted (LS) mean diff.	SE of diff.	N1
Pre - Post					
CONV	2715	3023	-307.2	630.7	9
ECC+	2712	2821	-109.3	598.4	10

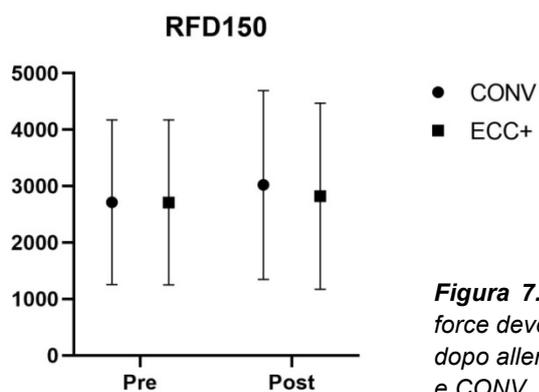


Figura 7.5 – Confronto del rate of force development a 150ms prima e dopo allenamento tra i gruppi ECC+ e CONV

Šidák's multi	Predicted (LS) mean diff	95.00% CI of diff.	Below threshold?	Summary	Adjusted P Value
Pre - Post					
CONV	-208.0	-1156 to 739.7	No	ns	0.8380
ECC+	42.94	-856.1 to 942.0	No	ns	0.9916
Test details	Predicted (LS) mean 1	Predicted (LS) mean 2	Predicted (LS) mean diff.	SE of diff.	N1
Pre - Post					
CONV	2507	2714	-208.0	386.5	9
ECC+	2702	2659	42.94	366.7	10

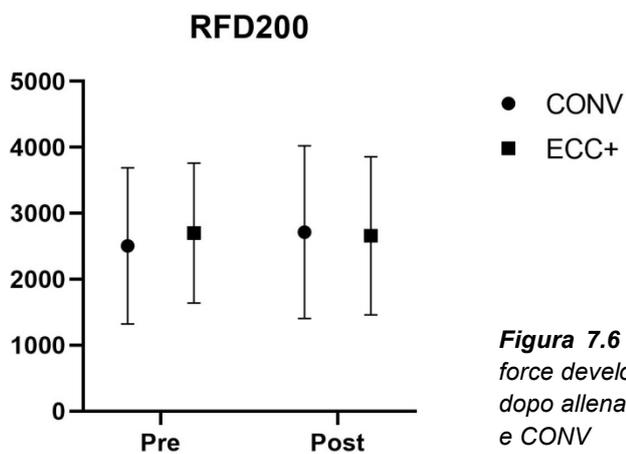


Figura 7.6 – Confronto del rate of force development a 200ms prima e dopo allenamento tra i gruppi ECC+ e CONV

Activation capacity

Per quanto riguarda l'AC, come si può notare dal grafico della figura 7.7, non sono risultate differenze significative dopo il periodo di allenamento o tra i due gruppi sperimentali.

Šidák's multi	Predicted (LS) mean diff.	95.00% CI of diff.	Below threshold?	Summary	Adjusted P Value
Pre - Post					
CONV	-1.249	-5.066 to 2.568	No	ns	0.6791
ECC+	0.9860	-2.635 to 4.607	No	ns	0.7632
Test details	Predicted (LS) mean 1	Predicted (LS) mean 2	Predicted (LS) mean diff.	SE of diff.	N1
Pre - Post					
CONV	91.33	92.58	-1.249	1.557	9
ECC+	93.20	92.21	0.9860	1.477	10

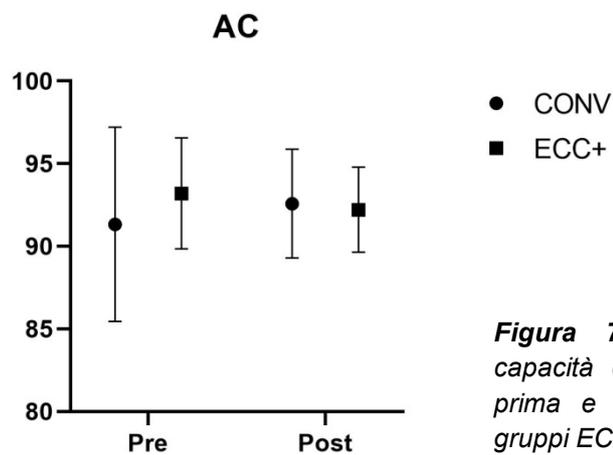


Figura 7.7 – Confronto della capacità di attivazione muscolare prima e dopo allenamento tra i gruppi ECC+ e CONV

CAPITOLO 8 – DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Lo scopo dello studio era di verificare se, a seguito di un periodo di allenamento di 4 settimane, si riscontravano degli aumenti nella forza massima isometrica, nella velocità da parte del soggetto di svilupparla e nella capacità di attivazione muscolare nel gruppo allenato con un sovraccarico nella fase eccentrica del movimento.

Esaminando i risultati, ciò che ci si aspettava al momento non si è verificato, non c'è stato nessun cambiamento nella massima forza isometrica, e questo può essere dovuto alla mancanza di un buon transfer tra la rilevazione dell'MVC, misurata con l'utilizzo di un dinamometro in condizioni statiche, e dell'1RM, misurato con la leg press in condizioni dinamiche; o al fatto che un angolo di flessione del ginocchio a 90° non è corretto per poter osservare i cambiamenti dopo 4 settimane di allenamento. Uno studio di Blazeovich, Cannavan, Coleman e Horne dimostra come il picco di forza sia generato con un angolo al ginocchio di 70° (figura 8.1).

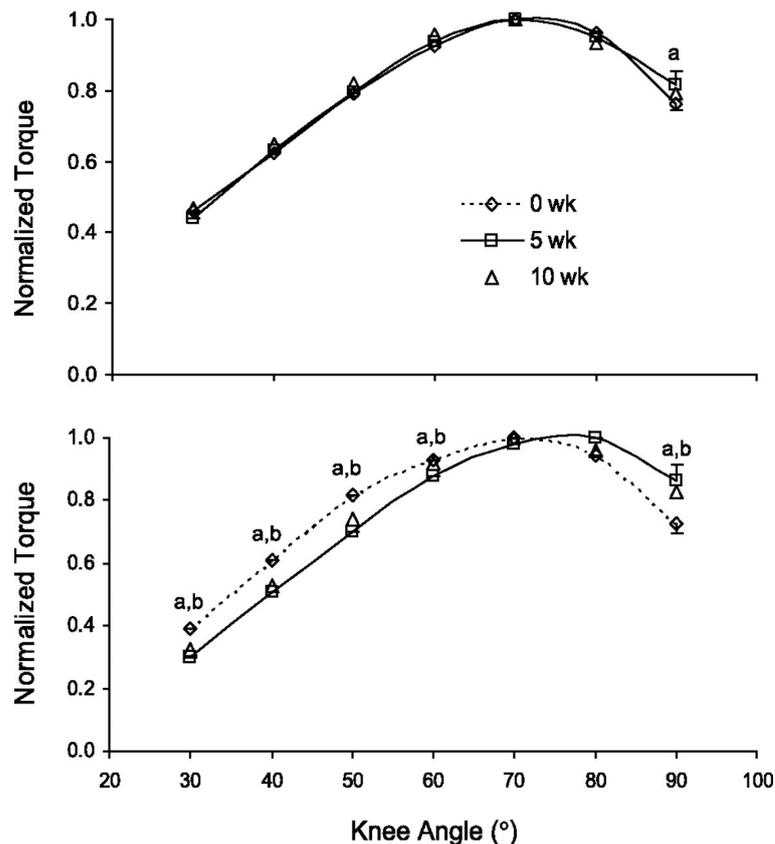


Figura 8.1 – Cambiamenti nella forza concentrica (in alto) ed eccentrica (in basso) specifica dell'angolo al ginocchio normalizzato con l'allenamento. (Blazeovich et al.)

Un limite di questo studio può essere rappresentato dalla scarsa numerosità campionaria, il che riduce la potenza statistica; quindi studi futuri dovrebbero analizzare le differenze nella massima forza isometrica tra un gruppo che si allena con un metodo tradizionale e un gruppo che si allena con un sovraccarico nella fase eccentrica, allungando il periodo di allenamento e cambiando l'angolo di flessione del ginocchio impostandolo a 70° come precedentemente illustrato.

Secondo la mia opinione, un buon programma di allenamento per la forza potrebbe prevedere sia la modalità di allenamento con il sovraccarico nell'eccentrica sia la modalità tradizionale. Vi sono molte metodiche indirizzate all'aumento della massa muscolare che sfruttano la fase eccentrica degli esercizi per attivare maggiormente i processi che portano alla sintesi proteica e dunque all'aumento di volume delle miofibrille. La metodica delle ripetizioni negative, per esempio, è una di queste. Essa presenta però il grosso svantaggio di richiedere la collaborazione di due compagni per il sollevamento del carico sopramassimale nella fase concentrica dell'esercizio. Biostrength permette invece di impostare automaticamente un carico sopramassimale nella fase eccentrica.

CONCLUSIONI

L'uso della fase eccentrica dell'esercizio appare particolarmente utile per contrastare il processo di senescenza muscolare. Andando a stimolare il muscolo durante la fase eccentrica dell'esercizio in modo controllato e sicuro com'è nel caso del macchinario preso in esame è possibile contrastare efficacemente la sarcopenia caratteristica dell'invecchiamento. Numerose possono essere le applicazioni della Biostrenght leg press Technogym, partendo dall'ambito del fitness negli utenti che ricercano ipertrofia o aumento di forza fino ad arrivare al professionismo, per la realizzazione di programmi per atleti nel periodo di mantenimento della forza ma anche nel periodo di preparazione. Un recente studio ha infatti dimostrato come il sovraccarico nella fase eccentrica migliori la potenza erogata nello squat jump e le prestazioni nel drop jump nei giovani giocatori di hockey.

Sarebbe curioso ed interessante vedere le applicazioni di questo macchinario in un periodo post-infortunio come mezzo per la riabilitazione.

BIBLIOGRAFIA

Bottinelli R, Reggiani C. Human skeletal muscle fibres: molecular and functional diversity. *Prog Biophys Mol Biol.* 2000;73(2-4):195-262. doi: 10.1016/s0079-6107(00)00006-7. PMID: 10958931.

Brooks SV. Current topics for teaching skeletal muscle physiology. *Adv Physiol Educ.* 2003 Dec;27(1-4):171-82. doi: 10.1152/advan.2003.27.4.171. PMID: 14627615.

D. A. Neumann, *Kinesiology of the musculoskeletal system. Foundations for rehabilitation*, s.l., MOSBY ELSEVIER (2010), Second edition

STRENGTH & CONDITIONING. Per una scienza del movimento dell'uomo Anno VIII - Numero 29 / Luglio-Settembre 2019

Maden-Wilkinson TM, Balshaw TG, Massey GJ, Folland JP. Muscle architecture and morphology as determinants of explosive strength. *Eur J Appl Physiol.* 2021 Apr;121(4):1099-1110. doi: 10.1007/s00421-020-04585-1. Epub 2021 Jan 17. PMID: 33458800; PMCID: PMC7966212.

Franchi MV, Reeves ND, Narici MV. Skeletal Muscle Remodeling in Response to Eccentric vs. Concentric Loading: Morphological, Molecular, and Metabolic Adaptations. *Front Physiol.* 2017 Jul 4;8:447. doi: 10.3389/fphys.2017.00447. PMID: 28725197; PMCID: PMC5495834.

Hughes DC, Ellefsen S, Baar K. Adaptations to Endurance and Strength Training. *Cold Spring Harb Perspect Med.* 2018 Jun 1;8(6):a029769. doi: 10.1101/cshperspect.a029769. PMID: 28490537; PMCID: PMC5983157.

Aagaard P, Simonsen EB, Andersen JL, Magnusson P, Dyhre-Poulsen P. Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. *J Appl Physiol* (1985). 2002 Oct;93(4):1318-26. doi: 10.1152/jappphysiol.00283.2002. PMID: 12235031.

Enoka RM. Muscle strength and its development. New perspectives. *Sports Med.* 1988 Sep;6(3):146-68. doi: 10.2165/00007256-198806030-00003. PMID: 3055145.

Krzysztofik M, Wilk M, Wojdała G, Gołaś A. Maximizing Muscle Hypertrophy: A Systematic Review of Advanced Resistance Training Techniques and Methods. *Int J Environ Res Public Health.* 2019 Dec 4;16(24):4897. doi: 10.3390/ijerph16244897. PMID: 31817252; PMCID: PMC6950543.

Suchomel TJ, Wagle JP, Douglas J, Taber CB, Harden M, Haff GG, Stone MH. Implementing Eccentric Resistance Training-Part 2: Practical Recommendations. *J Funct Morphol Kinesiol.* 2019 Aug 9;4(3):55. doi: 10.3390/jfmk4030055. PMID: 33467370; PMCID: PMC7739265.

Olsen S, Signal N, Niazi IK, Alder G, Rashid U, Nedergaard RB, Taylor D. Reliability of Tibialis Anterior Muscle Voluntary Activation Using the Interpolated Twitch Technique and the Central Activation Ratio in People with Stroke. *Brain Sci.* 2021 Feb 1;11(2):176. doi: 10.3390/brainsci11020176. PMID: 33535411; PMCID: PMC7912757.

Button DC, Behm DG. The effect of stimulus anticipation on the interpolated twitch technique. *J Sports Sci Med.* 2008 Dec 1;7(4):520-4. PMID: 24149960; PMCID: PMC3761925.

Elena Monti, Carlo Reggiani, Martino V. Franchi, Luana Toniolo, Marco Sandri, Andrea Armani, Sandra Zampieri, Emiliana Giacomello, Fabio Sarto, Giuseppe Sirago, Marta Murgia, Leonardo Nogara, Lorenzo Marcucci, Stefano Cicilio, Boštjan Šimunic, Rado Pisot, Marco V. Narici

Penko AL, Barkley JE, Koop MM, Alberts JL. Borg scale is valid for ratings of perceived exertion for individuals with Parkinson's disease. *Int J Exerc Sci.* 2017 Jan 1;10(1):76-86. PMID: 28479949; PMCID: PMC5213192.

Cleland CL, Hunter RF, Kee F, Cupples ME, Sallis JF, Tully MA. Validity of the global physical activity questionnaire (GPAQ) in assessing levels and

change in moderate-vigorous physical activity and sedentary behaviour. BMC Public Health. 2014 Dec 10;14:1255. doi: 10.1186/1471-2458-14-1255. PMID: 25492375; PMCID: PMC4295403.

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.

Horwath O, Paulsen G, Esping T, Seynnes O, Olsson MC. Isokinetic resistance training combined with eccentric overload improves athletic performance and induces muscle hypertrophy in young ice hockey players. J Sci Med Sport. 2019 Jul;22(7):821-826. doi: 10.1016/j.jsams.2018.12.017. Epub 2019 Jan 6. PMID: 30660559.