



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Scienze Biomediche

Corso di Laurea Triennale in Scienze Motorie

Tesi di Laurea

**CAMBIAMENTI NELLE PROPRIETÀ DELLE UNITÀ MOTORIE IN
RISPOSTA AD ALLENAMENTO DI FORZA CON SOVRACCARICO
ECCENTRICO VS CONVENZIONALE: UNA VALUTAZIONE
ATTRAVERSO ELETTROMIOGRAFIA AD ALTA DENSITÀ**

Relatore: Prof. Franchi Martino

Correlatore: Prof. Martino Giovanni

Laureando: Sgobbi Alessandro

N° di matricola: 2051090

Anno Accademico 2023/2024

INDICE

| | |
|--|----|
| ABSTRACT..... | 3 |
| 1. INTRODUZIONE..... | 5 |
| 1.1 Allenamento di forza con sovraccarico eccentrico..... | 5 |
| 1.2 Adattamenti strutturali e neuromuscolari all'allenamento di forza con sovraccarico eccentrico | 5 |
| 1.2.1 Adattamenti strutturali..... | 6 |
| 1.2.2 Adattamenti neuromuscolari..... | 6 |
| 1.3 HDsEMG..... | 7 |
| 1.4 Scopo dello studio | 7 |
| 2. MATERIALI E METODI..... | 8 |
| 2.1 Partecipanti | 8 |
| 2.2 Disegno sperimentale | 9 |
| 2.3 Protocollo sperimentale..... | 9 |
| 2.4 Protocollo di allenamento..... | 12 |
| 2.4.1 Protocollo di allenamento convenzionale | 13 |
| 2.4.2 Protocollo di allenamento con sovraccarico eccentrico..... | 13 |
| 2.5 Analisi HDsEMG | 14 |
| 2.6 Analisi statistica | 16 |
| 3. RISULTATI..... | 17 |
| 3.1 MVC (N) | 17 |
| 3.2 Proprietà delle unità motorie | 17 |
| 3.2.1 Soglia di reclutamento (%) | 18 |
| 3.2.2 Soglia di dereclutamento (%) | 18 |
| 3.2.3 Frequenza di scarica al reclutamento (pps)..... | 19 |
| 3.2.4 Frequenza di scarica al dereclutamento (pps) | 20 |
| 3.2.5 Frequenza di scarica steady state (pps) | 21 |
| 3.2.7 Velocità di conduzione (m/s)..... | 22 |
| 4. DISCUSSIONE..... | 23 |
| 4.1 MVC..... | 23 |
| 4.2 Soglia di reclutamento e soglia di dereclutamento..... | 24 |

| | |
|--|----|
| 4.3 Frequenza di scarica al reclutamento, dereclutamento, steady state | 24 |
| 4.4 Velocità di conduzione del segnale | 25 |
| 4.5 Limitazioni | 25 |
| 5. CONCLUSIONE | 26 |
| BIBLIOGRAFIA | 27 |

ABSTRACT

Scopo: La contrazione eccentrica permette di sviluppare maggiore forza con un minore dispendio energetico rispetto alla contrazione concentrica. L'introduzione di un sovraccarico durante la fase eccentrica di un movimento sembra combinare i benefici dell'allenamento di forza puramente eccentrico a quelli dell'allenamento convenzionale. Questo studio ha lo scopo di valutare se eguagliare l'attivazione neurale tra contrazione eccentrica e concentrica durante un programma di allenamento con sovraccarico eccentrico comporti cambiamenti distinti nel controllo neuromuscolare rispetto ad un allenamento convenzionale.

Metodi: Sedici giovani adulti (8F e 8M, età compresa tra i 19 e i 25 anni) sono stati divisi in due gruppi e sottoposti a 6 settimane di allenamento di forza: uno con protocollo convenzionale (CONV) e uno con sovraccarico eccentrico (ECC) pari a 50% in più rispetto alla fase concentrica. Prima e dopo le 6 settimane, è stata valutata la massima contrazione volontaria (MVC) dei muscoli estensori del ginocchio a 90° di flessione del ginocchio. Dopo aver determinato la MVC, i partecipanti hanno compiuto quattro contrazioni isometriche trapezoidali alternando prove al 35% a prove al 70% della MVC. Durante ogni prova è stato registrato il segnale elettromiografico del muscolo vasto laterale destro mediante elettromiografia ad alta densità (HDsEMG) da cui è stato estrapolato il comportamento delle unità motorie.

Risultati: La MVC è aumentata significativamente nel gruppo ECC dopo 6 settimane di allenamento (aumento medio di $47.2N \pm 53.5$). Nel gruppo ECC sono stati rilevati cambiamenti a carico delle unità motorie a bassa e media soglia. In particolare, nella soglia di dereclutamento (da $27.2\%MVC \pm 1.78$ a $29.3\%MVC \pm 1.76$) e nella frequenza di scarica al reclutamento (da $8.75\text{pps} \pm 0.83$ a $9.69\text{pps} \pm 0.818$) per le unità motorie a media soglia; nella frequenza di scarica steady state (da $13.2\text{pps} \pm 0.75$ a $13.9\text{pps} \pm 0.75$) per le unità motorie a bassa soglia. L'allenamento convenzionale ha fatto rilevare maggiori cambiamenti nel comportamento delle unità motorie a media e alta soglia rispetto all'allenamento con sovraccarico eccentrico, soprattutto per quanto riguarda soglia di reclutamento (da $29.4\%MVC \pm 0.704$ a $27.8\%MVC \pm 0.674$) e frequenza di scarica steady state (da $14.8\text{pps} \pm 1.41$ a $15.8\text{pps} \pm 1.41$) per le unità motorie a media soglia; frequenza di scarica steady state (da $10.9\text{pps} \pm 1.43$ a $14.2\text{pps} \pm 1.45$) e velocità di conduzione (da $4.93\text{m/s} \pm 0.2$ a $5.31\text{m/s} \pm 0.2$) per le unità motorie ad alta soglia.

Conclusione: L'allenamento con sovraccarico eccentrico sembra essere un metodo efficace per favorire cambiamenti distinti nel controllo neuromuscolare rispetto all'allenamento convenzionale. I

dati raccolti hanno prodotto risultati statisticamente significativi che sostengono un maggior aumento della MVC dopo allenamento con sovraccarico eccentrico. Tuttavia, l'allenamento con sovraccarico eccentrico non ha prodotto le variazioni aspettate nel comportamento delle unità motorie ad alta soglia.

1. INTRODUZIONE

1.1 Allenamento di forza con sovraccarico eccentrico

L'allenamento contro resistenza comprende i protocolli di allenamento che sfruttano esercizi di condizionamento con l'obiettivo di vincere una resistenza. Le proposte di allenamento di forza tradizionale consistono nella ripetizione di movimenti contro la medesima resistenza alternando una fase concentrica, in cui il muscolo si accorcia, a una fase eccentrica, in cui il muscolo si allunga. Tuttavia, le proposte tradizionali possono non essere sufficienti se l'obiettivo è quello di massimizzare la risposta muscolare a un allenamento contro resistenza; infatti, le due tipologie di contrazione normalmente sollecitate (eccentrica e concentrica) presentano delle differenze biomeccaniche, neuromuscolari e metaboliche [1]. La contrazione eccentrica permette di sviluppare maggiore forza con un minore dispendio energetico e un minore reclutamento di unità motorie rispetto alla contrazione concentrica [2]; sembra anche spostare la lunghezza ottimale per la generazione della forza verso lunghezze muscolari maggiori [3]. L'allenamento di tipo eccentrico può sovraccaricare il muscolo con un aumento di potenza (velocità e forza) più significativo rispetto alle altre forme di allenamento [4]. Per questo motivo si sta diffondendo all'interno della metodologia dell'allenamento la modalità che sfrutta un sovraccarico durante la fase eccentrica del movimento (EO). Questa modalità di allenamento permette di stimolare ottimamente il muscolo in entrambe le fasi di contrazione e portare nella fase eccentrica a un'attivazione neurale pari o superiore rispetto alla fase concentrica [5]. Gli autori Franchi e Mafiuletti [6] sottolineano l'importanza di classificare in modo più accurato l'allenamento eccentrico in relazione anche ai meccanismi fisiologici che comporta. In particolare, le diverse modalità di allenamento potrebbero portare a adattamenti neurali specifici. Alcuni studi [7], [8], [9] suggeriscono che in acuto l'allenamento eccentrico comporti cambiamenti sostanziali nel reclutamento delle unità motorie con una riduzione della frequenza di scarica e della velocità di conduzione del segnale soprattutto a carico delle unità motorie ad alta soglia. Tuttavia, pochi studi hanno analizzato il comportamento delle unità motorie dopo allenamento di forza con EO [10]. Si pensa che il contributo neurale potrebbe essere importante nell'aumento di forza e nella strategia di reclutamento delle unità motorie, ma non si conoscono quali siano i cambiamenti specifici che avvengono.

1.2 Adattamenti strutturali e neuromuscolari all'allenamento di forza con sovraccarico eccentrico

L'allenamento di forza con EO sembra combinare i benefici dell'allenamento puramente eccentrico a quelli dell'allenamento convenzionale promuovendo adattamenti strutturali e neuromuscolari specifici.

1.2.1 Adattamenti strutturali

Le modalità di allenamento di forza puramente concentrico e puramente eccentrico portano a degli adattamenti regionali contrazione specifici: una maggiore ipertrofia del ventre muscolare è associata all'allenamento concentrico, mentre una maggiore ipertrofia distale è associata all'allenamento eccentrico [11]. La contrazione eccentrica promuove un aumento della lunghezza dei fascicoli [5], diversamente la contrazione concentrica si traduce in maggiori cambiamenti dell'angolo di pennazione [4]. Questo comportamento può essere spiegato dall'aggiunta di sarcomeri in serie nell'aumento di lunghezza dei fascicoli e dall'aggiunta di sarcomeri in parallelo per l'aumento dell'angolo di pennazione [12]. L'allenamento puramente eccentrico può avere un transfer limitato alle attività sportive a causa della mancanza del ciclo allungamento-accorciamento [10]. L'introduzione dell'allenamento di forza con EO permette di stimolare efficacemente il muscolo in entrambe le fasi di contrazione all'interno del ciclo allungamento-accorciamento con un aumento della cross sectional area (CSA) delle fibre muscolari Ix, ma non delle altre fibre [13]. Infine, sembra migliorare la potenza in modo significativo [4], accompagnata da aumento nella prestazione di salto [13].

1.2.2 Adattamenti neuromuscolari

Dal punto di vista neurale alcuni studi hanno mostrato degli adattamenti relativi ai parametri di frequenza di scarica e soglia di reclutamento. Ad esempio, un protocollo di allenamento di forza convenzionale aumenta la frequenza di scarica durante contrazioni massimali [14], ma non modifica la soglia di reclutamento [15]. Dopo due sessioni di contrazioni eccentriche [16] è stata rilevata una maggiore diminuzione della soglia di reclutamento dopo la prima sessione rispetto alla seconda. Il contrario avviene per la soglia di dereclutamento. Alterazioni in acuto a livello neurale dovute a contrazioni con o senza sovraccarico eccentrico [9] suggeriscono una maggior diminuzione della frequenza di scarica nelle unità motorie ad alta soglia dopo contrazione con sovraccarico eccentrico.

È possibile che l'allenamento di forza con EO stimoli maggiormente le fibre di tipo II che contengono un maggior numero di unità motoria ad alta soglia rispetto alle fibre di tipo I [17]. Tuttavia, gli articoli citati non spiegano il comportamento di popolazioni di unità motorie anche in relazione agli adattamenti neurali in cronico conseguenti all'utilizzo del EO. Per questi motivi, all'interno dello studio è stata utilizzata la tecnica dell'elettromiografia ad alta densità (HDsEMG).

1.3 HDsEMG

La forza esercitata durante una contrazione muscolare dipende dal numero e tipo di unità motorie reclutate e dalla loro frequenza di scarica [18]. Le tecniche proposte dalla letteratura scientifica per valutare gli adattamenti nelle proprietà delle unità motorie sono diverse. In gran parte degli studi sono state utilizzate le tecniche dell'EMG intramuscolare (iEMG) o dell'EMG di superficie (sEMG); negli ultimi anni, l'uso dell'elettromiografia ad alta densità (HDsEMG) è stato progressivamente introdotto. Mediante l'utilizzo di matrici di elettrodi posizionate superficialmente al muscolo questa tecnica fornisce un campionamento spazio-temporale dell'attività elettrica delle singole unità motorie [19]. A partire dalla decomposizione dei segnali HDsEMG è possibile valutare le proprietà delle singole unità motorie; alcuni tra i parametri più valutati in letteratura sono: frequenza di scarica (DR, discharge rate), soglia di reclutamento (RT, recruitment threshold) e dereclutamento (DT, derecruitment threshold), velocità di conduzione del segnale (CV, conduction velocity). In particolare, protocolli di allenamento di forza isometrici aumentano la frequenza di scarica, diminuiscono la soglia di reclutamento [20] e aumentano la velocità di conduzione del segnale [17] delle unità motorie ad alta soglia. In acuto e per le unità motorie a media soglia, contrazioni isometriche successive a contrazioni puramente concentriche o puramente eccentriche [21] mostrano un maggiore aumento della frequenza di scarica dopo contrazione concentrica e una maggiore diminuzione nella soglia di reclutamento in seguito a esercizio eccentrico. È possibile che utilizzare un programma di allenamento di forza che preveda EO porti a cambiamenti analoghi nelle proprietà delle unità motorie.

1.4 Scopo dello studio

Ad oggi gli adattamenti neurali in seguito ad allenamento contro resistenza coinvolgente esercizio con sovraccarico eccentrico non sono ancora del tutto compresi, principalmente a causa della mancanza di studi longitudinali che abbiano monitorato alterazioni a livello neurale in cronico. Considerate queste limitazioni, lo scopo dello studio è indagare i cambiamenti nelle proprietà delle unità motorie in risposta ad allenamento di forza con sovraccarico eccentrico vs convenzionale. Verrà utilizzata l'HDsEMG per valutare le proprietà delle unità motorie prima e dopo un protocollo di allenamento contro resistenza dalla durata di sei settimane. Al termine di sei settimane di allenamento di forza ci si aspetta un aumento maggiore della MVC dopo protocollo di allenamento con EO. Un maggiore adattamento delle unità motorie ad alta soglia e un aumento della velocità di conduzione del segnale per entrambi i protocolli di allenamento. Inoltre, sono attesi adattamenti distinti tra i protocolli per quanto riguarda la soglia di reclutamento e la frequenza di scarica.

2. MATERIALI E METODI

2.1 Partecipanti

Per questo studio sono stati coinvolti 16 soggetti (8 femmine; 8 maschi). I partecipanti sono stati reclutati attraverso locandine, social media, passaparola. È stato creato appositamente un questionario online al quale sono pervenute 56 richieste di partecipazione; le richieste sono state esaminate dal gruppo di ricerca con il fine di selezionare i soggetti che rientrassero nei criteri di inclusione. In particolare, il questionario chiedeva informazioni circa età, massa corporea, statura, stato di salute (patologie pregresse, infortuni o interventi chirurgici subiti, assunzione di farmaci) e livello di attività fisica. Dal momento che lo scopo del progetto è stato quello di indagare i cambiamenti nelle proprietà delle unità motorie indotti da allenamento di forza con sovraccarico eccentrico e allenamento di forza convenzionale, era necessario che i partecipanti non fossero atleti agonistici e che praticassero attività fisica ricreativa fino a un massimo di 2-3 volte a settimana. I criteri di inclusione sono stati i seguenti: età compresa tra i 18 e i 35 anni; indice di massa corporea tra 18.5 e 26 $Kg \times m^{-2}$; sanità fisica e mentale; essere attivi fisicamente per un massimo di 3 giorni a settimana; essere in possesso di un certificato medico di idoneità sportiva non agonistica. Non sono stati selezionati i soggetti che hanno subito un infortunio (fratture) durante i 24 mesi precedenti all'inizio dello studio, chi aveva patologie croniche, gli atleti agonistici. Inoltre, per non alterare i test in laboratorio, i partecipanti hanno accettato di astenersi dal praticare allenamento contro resistenza per gli arti inferiori durante tutto il periodo dello studio. Tutti i partecipanti hanno fornito il consenso informato prima della partecipazione dello studio secondo i protocolli approvati dal Comitato Etico locale. I 16 partecipanti (8 femmine e 8 maschi) sono stati divisi casualmente in due gruppi di ugual numero e ugual ripartizione tra i sessi (4 femmine e 4 maschi per gruppo). Un gruppo al quale corrispondeva il protocollo di allenamento con sovraccarico eccentrico è stato denominato "ECC" (N=8); il gruppo al quale corrispondeva il protocollo di allenamento convenzionale è stato denominato "CONV" (N=8). A ciascun partecipante corrispondeva un codice alfanumerico per essere riconosciuto: ECC o CONV in base al gruppo di appartenenza; 24 corrispondente all'anno corrente; 01-08 per riconoscere i soggetti all'interno del gruppo. (Esempio: ECC2402 = soggetto del gruppo ECC con codice 02).

| Gruppo | Sesso | Numerosità (n) | Età |
|--------|-------|----------------|----------|
| ECC | F | 4 | 21.8±1.7 |
| | M | 4 | 21±1.4 |
| CONV | F | 4 | 23±1.6 |
| | M | 4 | 22.8±2.1 |

Tabella 2.1. Numerosità campionaria di ciascun gruppo diviso in femmine e maschi e età (rappresentata come media (M) \pm deviazione standard (SD)).

2.2 Disegno sperimentale

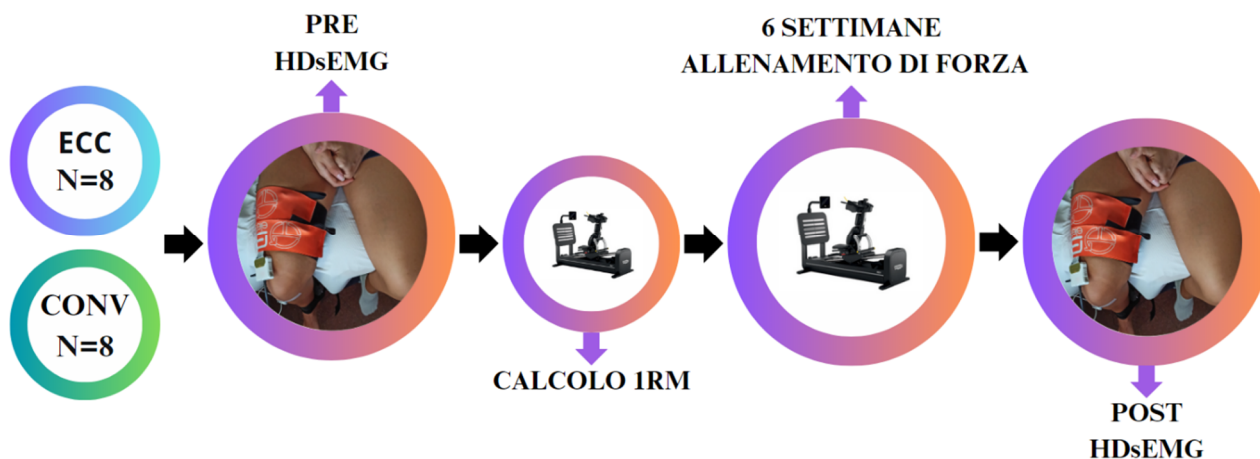


Figura 2.1. Panoramica dello studio e del disegno sperimentale. 16 partecipanti sono stati divisi in due gruppi di numerosità campionaria pari a 8 per gruppo (ECC=8 e CONV=8). Durante la prima visita (PRE HDsEMG) sono stati eseguiti i test sperimentali iniziali. La seconda visita (calcolo 1RM) è servita per trovare l'1RM di ogni soggetto. 6 settimane di allenamento di forza (ECC=protocollo di allenamento con sovraccarico eccentrico, CONV=protocollo di allenamento convenzionale) hanno seguito le prime due visite. Nell'ultima visita (POST HDsEMG) sono stati eseguiti i test sperimentali finali.

Lo studio ha avuto una durata di circa 8 settimane e sviluppato come segue: una seduta di familiarizzazione in laboratorio a cui è seguita la valutazione neuromuscolare iniziale, una seconda visita in palestra per la valutazione della forza massima, 6 settimane di allenamento di forza, un'ultima seduta per i test neuromuscolari finali (Figura 2.1). La prima visita (PRE HDsEMG) ha avuto lo scopo di spiegare le procedure dello studio e istruire i singoli partecipanti rispetto al test neuromuscolare che avrebbero dovuto affrontare. Successivamente, i soggetti sono stati sottoposti ai test sperimentali di valutazione iniziale attraverso registrazione dell'attività mioelettrica del muscolo vasto laterale (VL) con elettromiografia ad alta densità (HDsEMG). Durante la seconda visita (calcolo 1RM), dopo che ogni partecipante ha preso familiarità con la Leg-press Biostrength® (Technogym S.p.A, Italia), è stata valutata la forza massima dell'arto inferiore destro per adattare il protocollo di allenamento di forza. Alle prime due visite ha seguito il programma di allenamento di forza dalla durata di 6 settimane. Nell'ultima visita (POST HDsEMG) sono stati eseguiti i test sperimentali di valutazione finale.

2.3 Protocollo sperimentale

Ai partecipanti sono state richieste due visite in laboratorio per l'acquisizione dei segnali HDsEMG del muscolo VL destro: la prima antecedente l'inizio del protocollo di allenamento di forza, la

seconda al termine delle sei settimane di allenamento; entrambe senza variazione nel protocollo sperimentale. I soggetti sedevano a una altezza tale da non toccare terra con i piedi; anca, ginocchio e caviglia erano a 90° di flessione sul piano sagittale (Figura 2.2). La caviglia dell'arto inferiore destro è stata bloccata con delle fasce con velcro a un dinamometro con una cella di carico (RS 206-0290) (Figura 2.3). L'altezza della cinghia dipendeva dalle caratteristiche antropometriche di ogni soggetto e si trovava poco sopra ai malleoli. Per evitare qualsiasi movimento compensatorio dell'anca durante l'acquisizione dei dati, il bacino di ogni partecipante è stato stabilizzato alla seduta con un'ulteriore fascia con velcro. Per ogni sessione sperimentale sono stati acquisiti i dati dell'arto inferiore destro alla flessione di ginocchio di 90° . È stata misurata la distanza tra la testa della fibula e il malleolo laterale per garantire la riproducibilità del set-up sperimentale nei test sperimentali finali.



Figure 2.2 e 2.3. In foto un partecipante pronto per l'esecuzione dei test HDsEMG (Figura 2.2) e il dinamometro utilizzato nei test sperimentali (Figura 2.3).

Ogni sessione sperimentale iniziava con la misurazione della massima contrazione volontaria (MVC) dei muscoli estensori di ginocchio dell'arto inferiore destro. Dopo un riscaldamento costituito da qualche contrazione volontaria submassimale, ai partecipanti è stato richiesto di raggiungere la massima contrazione volontaria (MVC) esprimendo il massimo sforzo spingendo il più forte possibile con la gamba destra contro la cella di carico e mantenendo la contrazione per 3-4 secondi. La MVC è stata misurata al meglio di 3 prove massimali con 1 minuto di pausa tra le prove. Dopo aver determinato la MVC, i partecipanti hanno compiuto una contrazione isometrica triangolare come fase di familiarizzazione seguita da quattro contrazioni isometriche trapezoidali al 35% e 70% della MVC. Ciascuna rampa era caratterizzata da una fase ascendente (incremento della forza fino al raggiungimento dell'intensità specifica), da una fase di steady state (mantenimento della forza raggiunta), una fase discendente con decremento della forza espressa fino a ritornare pari a 0 al

termine della prova. La velocità di contrazione richiesta durante la fase ascendente e discendente era del 5% MVC/s. Per la rampa al 35% della MVC, le fasi ascendente e discendente avevano una durata di 7" con una steady state di 19" (Figura 2.4). La rampa al 70% della MVC aveva fasi ascendente e discendente di 14" ciascuna e una durata della steady state di 5" (Figura 2.5). Ogni prova è stata intervallata da 50" di pausa ed eseguita nel seguente ordine: 35% - 70% - 35% - 70%MVC. Un feedback visivo dato da un "percorso" costituito da un binario dalla forma trapezoidale e una pallina da mantenere al suo interno indicava la forza da raggiungere richiesta.

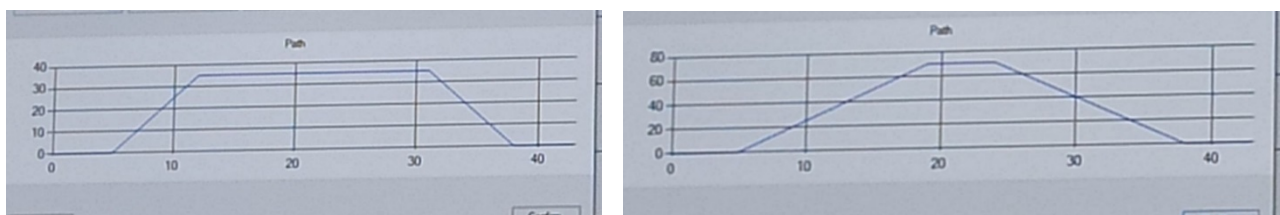


Figure 2.4 e 2.5. Rampe trapezoidali rispettivamente al 35%MVC (Figura 2.4) e 70%MVC (Figura 2.5). Sull'asse X è presente il tempo in s, sull'asse Y la percentuale della MVC. Si possono apprezzare le fasi ascendente, steady state e discendente.

Durante l'acquisizione del segnale HDsEMG non è stato concesso ai partecipanti di poggiare la schiena allo schienale al fine di evitare movimenti compensatori. Per ogni prova, è stato registrato il segnale elettromiografico acquisito mediante elettromiografia ad alta densità (HDsEMG) a 2048Hz usando un amplificatore multicanale (Quattrocento, OTBIOelettronica, Torino, Italia). Il segnale HDsEMG è stato acquisito dal muscolo VL usando una matrice a 64 elettrodi (13x5) con una distanza interelettrodo di 8 mm (GR08MM1305, OTBIOelettronica, Torino, Italia, Figura 2.6). Per migliorare la trasmissione e registrazione del segnale veniva applicata una pasta conduttiva (SpesMedica, Battipaglia, Italia) sopra ogni matrice. Inoltre, la cute di ogni partecipante è stata preparata per HDsEMG mediante rasatura della zona interessata e sfregatura con pasta abrasiva in grado di eliminare le impurità della pelle. In accordo con le linee guida proposte dalla letteratura, la matrice è stata posizionata sopra la zona di innervazione del muscolo (punto motore) [22] e in parallelo all'orientamento delle fibre muscolari [23] (Figura 2.7). Per individuare il punto motore nell'area distale del muscolo VL con maggiore attivazione è stata somministrata una stimolazione elettrica percutanea (DS7A Digitimer Ltd, Welwyn Garden, Hertfordshire, Regno Unito, Figura 2.8) a bassa intensità (8-16 mA); successivamente, è stato rilevato l'orientamento delle fibre muscolari



Figura 2.6. Matrice di 64 elettrodi utilizzata per l'HDsEMG.

utilizzando ecografia muscolare (ArtUs, Telemed, Milano, Italia). Per garantire la riproducibilità nel posizionamento della griglia gli operatori hanno segnato l'elettrodo della griglia corrispondente alla posizione del punto motore dei soggetti.



Figure 2.7 e 2.8. Matrice centrata al punto motore e posizionata in parallelo all'orientamento delle fibre del muscolo vasto laterale (Figura 2.7) e Digitimer DS7A utilizzato per somministrare le stimolazioni elettriche percutanee (Figura 2.8).

2.4 Protocollo di allenamento

A partire dalla settimana successiva alla somministrazione dei test, i partecipanti sono stati sottoposti a 6 settimane di allenamento di forza, con frequenza di 3 allenamenti settimanali supervisionati e affiancati, dalla durata di 30-40 minuti ciascuno. Gli allenamenti sono stati in totale 18 a cui va aggiunta una sessione di familiarizzazione iniziale con la Leg-press Biostrength® (Technogym S.p.A, Italia, Figura 2.9). Inoltre, ciascun allenamento era separato da almeno 24 ore per garantire un adeguato recupero. La prima visita in palestra è servita per la spiegazione del protocollo di allenamento, delle funzioni della leg-press che sarebbero state utilizzate nel corso delle settimane e infine per il calcolo del massimale. Fondamentale nel protocollo di allenamento è stata la spiegazione e somministrazione prima e dopo ogni sessione di allenamento (compresa la prima visita) delle scale Borg [24] e Soreness.



Figura 2.9. Leg-press Biostrength® (Technogym S.p.A, Italia) utilizzata per lo studio. Immagine acquisita da: <https://www.technogym.com/it-IT/biostrength-rev/>

Attraverso la modalità “test del ROM avanzato” del macchinario è stato trovato il range of motion (ROM) di ogni partecipante; solo successivamente è stato calcolato il massimale monopodalico dell’arto inferiore destro in due differenti modalità: indiretta e diretta. Il massimale indiretto è stato calcolato con la formula di Brzycki ($1RM = \text{peso sollevato} / [1.0278 - (0.0278 \times \text{numero di ripetizioni})]$) [25] a partire da un 5RM trovato entro 4 serie con una pausa di 3 minuti ciascuna. La speciale modalità “forza dinamica” della leg press, che consisteva in 3 ripetizioni concentriche massimali eseguite con il massimo sforzo, ha permesso di calcolare direttamente il massimale. Per una maggiore precisione è stato sempre utilizzato il massimale calcolato indirettamente per determinare il carico degli allenamenti. Prima di ogni allenamento veniva eseguito il “test del ROM avanzato” a cui seguiva una fase di riscaldamento che consisteva in 10 ripetizioni monopodaliche per ciascun arto sulla leg press con il 30% di 1RM e altre 5 per gamba con il 50% di 1RM.

2.4.1 Protocollo di allenamento convenzionale

Per il gruppo di controllo (CONV) l’allenamento consisteva in 4 serie per gamba da 10 ripetizioni al 70% del massimale con carico costante in entrambe le fasi del movimento. Per le ultime due settimane di allenamenti le serie sono passate a 5 per gamba da 10 ripetizioni al 70% di 1RM. La pausa è stata fissata a 3 minuti dalla fine della serie con la gamba destra all’inizio della successiva con il medesimo arto.

| Seduta | Visita | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------------------------|---------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|---------|
| Info | Massimale + test dinamico | | | | Massimale | | | Massimale | |
| Serie/reps | | 4x10 | 4x10 | 4x10 | 4x10 | 4x10 | 4x10 | 4x10 | 4x10 |
| Intensità* conc-ecc | | 70%-70% | 70%-70% | 70%-70% | 70%-70% | 70%-70% | 70%-70% | 70%-70% | 70%-70% |

| Seduta | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|----------------------------|---------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------------------------|
| Info | | Massimale | | | Massimale | | | Massimale | | Massimale + test dinamico |
| Serie/reps | 4x10 | 4x10 | 4x10 | 4x10 | 5x10 | 5x10 | 5x10 | 5x10 | 5x10 | 5x10 |
| Intensità* conc-ecc | 70%-70% | 70%-70% | 70%-70% | 70%-70% | 70%-70% | 70%-70% | 70%-70% | 70%-70% | 70%-70% | 70%-70% |

Tabella 2.2 Protocollo di allenamento CONV. *Intensità 70%-70% rispetto a 1RM.

2.4.2 Protocollo di allenamento con sovraccarico eccentrico

Il gruppo sperimentale (ECC) aveva 4 serie per gamba da 8 ripetizioni al 70% del massimale in concentrica e in eccentrica 1.5 volte il carico concentrico. Durante le due settimane finali di

allenamento le serie da 4 sono passate a 5 per gamba. Una pausa di 3 minuti divideva la fine della serie con la gamba destra alla successiva con la medesima gamba.

| | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|-----------|--------------|--------------|-----------|--------------|
| Seduta | Visita | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Info | Massimale + test dinamico | | | | Massimale | | | Massimale | |
| Serie/reps | | 4x8 | 4x8 | 4x8 | 4x8 | 4x8 | 4x8 | 4x8 | 4x8 |
| Intensità* conc-ecc | | 70%- 105% | 70%- 105% | 70%- 105% | 70%-105% | 70%- 105% | 70%- 105% | 70%-105% | 70%- 105% |

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------|-----------|--------------|--------------|-----------|--------------|--------------|-----------|--------------|---------------------------------|
| Seduta | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| Info | | Massimale | | | Massimale | | | Massimale | | Massimale + test dinamico |
| Serie/reps | 4x8 | 4x8 | 4x8 | 4x8 | 5x8 | 5x8 | 5x8 | 5x8 | 5x8 | 5x8 |
| Intensità* conc-ecc | 70%- 105% | 70%-105% | 70%- 105% | 70%- 105% | 70%-105% | 70%- 105% | 70%- 105% | 70%-105% | 70%- 105% | 70%-105% |

Tabella 2.3. Protocollo di allenamento ECC. *Intensità 70%-105% rispetto a 1RM.

Con questo volume settimanale è stato possibile sottoporre i partecipanti di entrambi i gruppi al medesimo volume di allenamento, questo ha reso possibile un confronto oggettivo della risposta dell'organismo ai due protocolli di esercizio. Il massimale indiretto è stato ritestato all'inizio di ogni primo allenamento settimanale con il fine di rendere i carichi di allenamento effettivamente allenanti durante tutta la durata del protocollo. Il time under tension (TUT) è stato standardizzato attraverso un metronomo in 2 secondi in fase concentrica e 2 secondi in fase eccentrica. Ha chiuso il protocollo di allenamento la diciottesima sessione di allenamento in cui è stato ricalcolato il massimale indiretto, ricalcolato il massimale diretto con la modalità "forza dinamica" ed eseguite le 5 serie allenanti.

2.5 Analisi HDsEMG

Il segnale HDsEMG (*Figura 2.10*) di ogni prova è stato filtrato e sottoposto a un processo di decomposizione. Dopo il filtraggio passa-banda (20-500Hz, filtro Butterworth di secondo ordine), il segnale HDsEMG è stato decomposto in potenziali d'azione delle singole unità motorie utilizzando un l'algoritmo blind source separation (DEMUSE implementato nel software Matlab) [26], [27], [19].

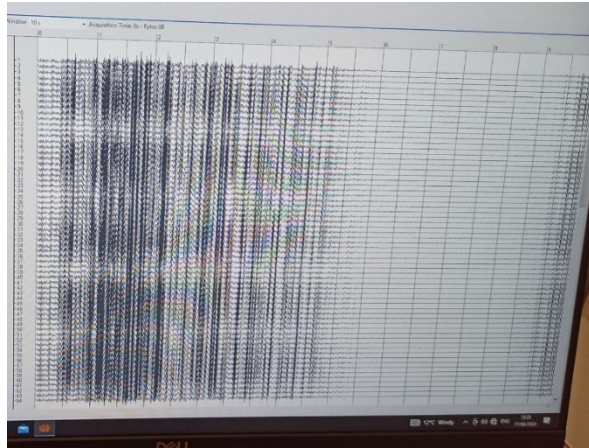


Figura 2.10. I 64 segnali degli elettrodi della matrice. A riposo il segnale è piatto come si può vedere a destra, durante una contrazione volontaria il segnale è come a sinistra.

Tutti gli spike delle unità motorie decomposte sono stati ispezionati visivamente e modificati manualmente da operatori addestrati utilizzando il pacchetto DEMUSE [28] implementato nel software Matlab. Questo processo di ispezione visuale ha consentito di analizzare le unità motorie decomposte correggendo gli errori ed eliminando i duplicati se necessario (Figura 2.11).

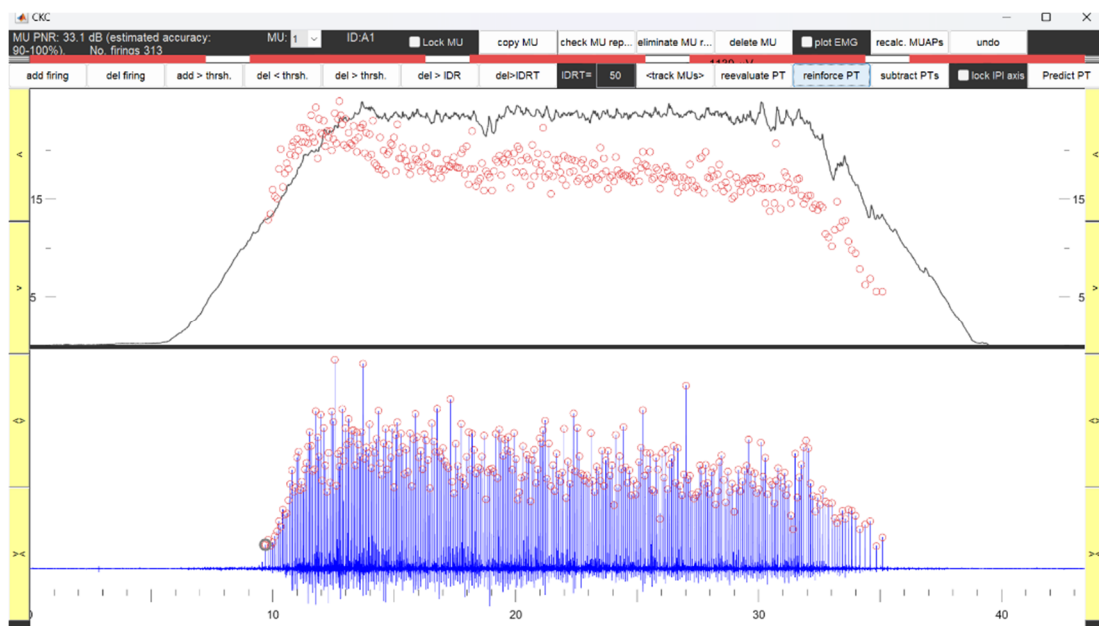


Figura 2.11. Esempio di unità motoria ispezionata e ripulita con il pacchetto DEMUSE nel software Matlab. L'unità motoria presenta 313 impulsi (potenziali d'azione) e si riferisce alla rampa trapezoidale di intensità 35%MVC.

A partire dai file analizzati e ripuliti sono state estratte le proprietà delle unità motorie utilizzando il programma Openhdemg scritto in Python [29]. Oltre alla MVC, le variabili di maggiore interesse ricavate con il fine di valutare i cambiamenti nelle proprietà delle unità motorie sono state le seguenti.

- Soglia di reclutamento: livello minimo di forza (espresso in termini assoluti o relativi in %MVC) necessario per attivare una determinata unità motoria;
- Soglia di dereclutamento: livello di forza (espresso in termini assoluti o relativi in %MVC) al di sotto del quale un'unità motoria da attivata cessa di essere attiva;
- Frequenza di scarica delle unità motorie (DR): la frequenza con cui i potenziali di azione vengono inviati dal motoneurone alle fibre muscolari. La DR è stata valutata al reclutamento, al dereclutamento e in tutta la durata della steady state;
- Velocità di conduzione: velocità con cui il potenziale di azione si propaga lungo le fibre muscolari del muscolo vasto laterale.

2.6 Analisi statistica

Tutti i test statistici sono stati eseguiti in R (versione 4.1.0) utilizzando RStudio environment (versione 1.4.1717). Nell'analisi statistica gli effetti prodotti dall'allenamento contro resistenza sulla MVC sono stati studiati con ANOVA a una via e paired t-test; le variazioni nei parametri delle unità motorie sono state valutate con linear mixed models usando il pacchetto lmerTest. Ciascuna unità motoria è stata trattata come misure ripetute, considerando come fattore fisso il tempo (PRE e POST) e come fattore variabile i partecipanti. Per ogni gruppo e ogni intensità (35% e 70%MVC) sono stati utilizzati diversi linear mixed models. La media marginale stimata, con intervallo di confidenza al 95%, è stata calcolata utilizzando il pacchetto emmeans. I risultati della MVC sono riportati come aumento medio \pm deviazione standard. I risultati dell'analisi delle MU sono riportati in valore medio \pm errore standard. Il livello di significatività è stato fissato a $\alpha = 0,05$.

3. RISULTATI

Per l'angolo di flessione di ginocchio a 90°, dei 16 partecipanti reclutati, in 3 soggetti non è stato possibile identificare unità motorie per la rampa trapezoidale a intensità 70%MVC, mentre per 1 soggetto non sono state trovate unità motorie nella valutazione finale per la prova al 70%MVC. In totale sono state identificate 502 unità motorie (150 MU 35%MVC PRE, 157 MU 35%MVC POST, 92 MU 70%MVC PRE, 103 MU 70%MVC POST). Per ciascun partecipante sono state individuate in media $17.6\text{MU}\pm 9.0^*$ per 35%PRE; $18.5\text{MU}\pm 9.0^*$ per 35%POST; $13.1\text{MU}\pm 7.3^*$ per 70%PRE; $15.8\text{MU}\pm 7.6^*$ per 70%POST (risultati in numero medio \pm deviazione standard).

3.1 MVC (N)

Sia il protocollo di allenamento CONV che il protocollo di allenamento ECC hanno influenzato la forza massima espressa dai muscoli estensori di ginocchio. Al termine dei protocolli di allenamento, il paired t-test ha rilevato solo per il gruppo ECC un aumento significativo dei valori di MVC (aumento medio di $47.2\text{N}\pm 53.5^*$, $p=0.0411$); non ci sono state variazioni significative in MVC del gruppo CONV (aumento medio di $26.9\text{N}\pm 55.4^*$, $p=0.211$) (Figura 3.1).

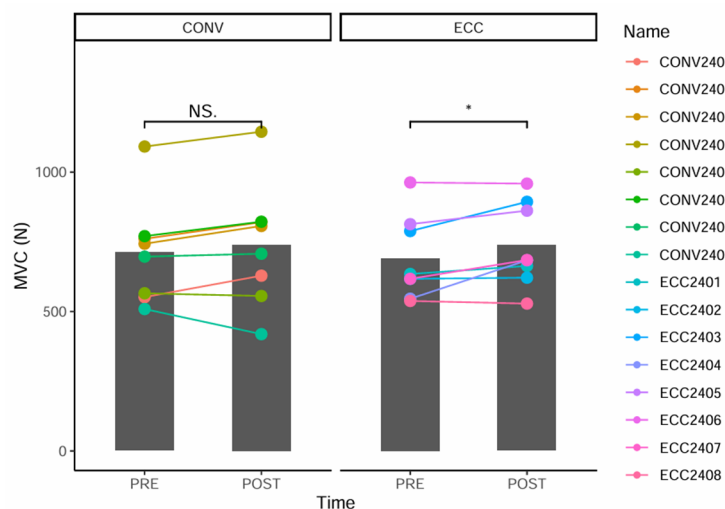


Figura 3.1. Cambiamenti nell'MVC (in N) tra PRE e POST protocollo di allenamento divisi per gruppo CONV e gruppo ECC. *Deviazione standard

3.2 Proprietà delle unità motorie

Nella valutazione dei cambiamenti nelle proprietà delle unità motorie sono state analizzate le differenze tra gruppi (CONV e ECC) e tra PRE e POST dello stesso gruppo. Inoltre, le unità motorie sono state divise in unità motorie reclutate a 0-25%MVC (bassa soglia), reclutate a 25-50%MVC (media soglia) e a 50-70%MVC (alta soglia). Per la rampa al 35%MVC sono reclutate unità motorie

a bassa e media soglia, mentre per la rampa al 70%MVC sono reclutate unità motorie a bassa, media e alta soglia.

3.2.1 Soglia di reclutamento (%)

La soglia di reclutamento (relativa) è il valore percentuale della forza alla quale l'unità motoria inizia la sua attività. I risultati mostrano che nella rampa al 35%MVC, per le MU 0-25%MVC (Figura 3.2A) non sono state trovate differenze significative nella soglia di reclutamento né tra gruppi ($p=0.534$), né tra PRE e POST (CONV $p=0.4419$; ECC $p=0.4597$). Risultati simili sono stati trovati anche per le UM 25-50%MVC nell'interazione tra gruppi ($p=0.894$); tuttavia, tra PRE e POST nel gruppo CONV (Figura 3.2B) è stata trovata una diminuzione significativa ($p=0.0089$) della soglia di reclutamento, passando da $29.4\%MVC \pm 0.704$ a $27.8\%MVC \pm 0.674$. Per la rampa al 70%MVC, non è stata trovata nessuna variazione significativa nelle soglie di reclutamento (Figura 3.2C, D e E).

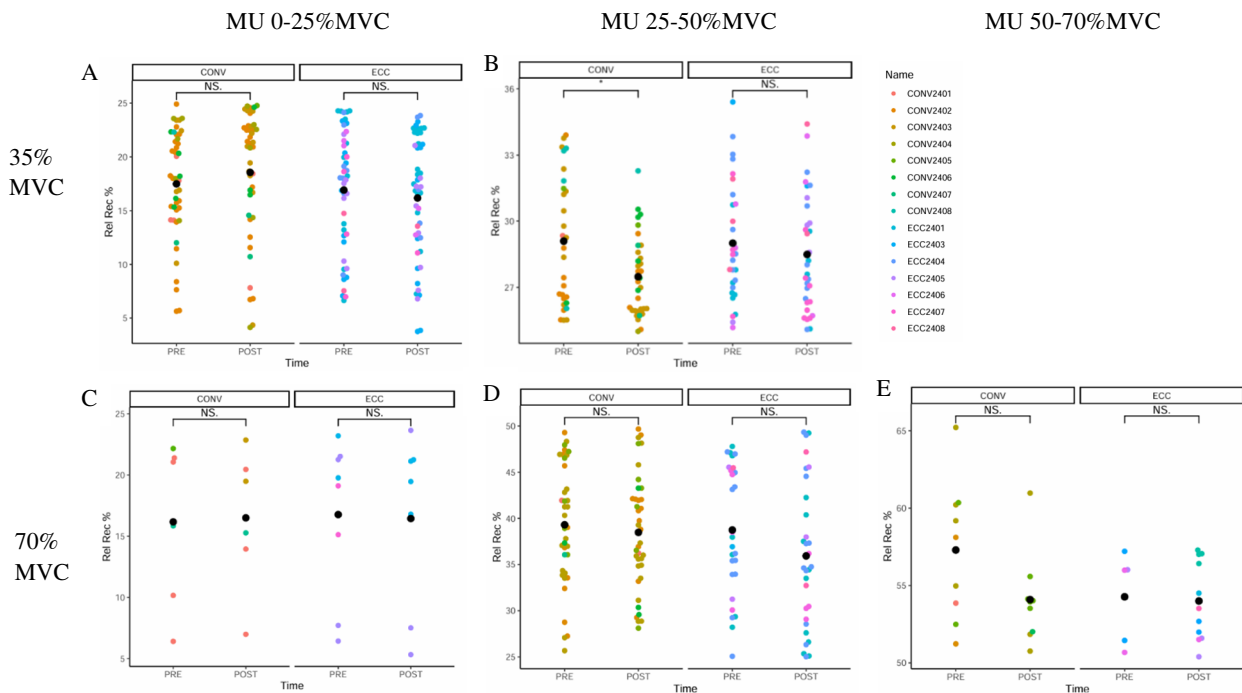


Figura 3.2. Soglia di reclutamento in %MVC relativa alla rampa 35%MVC (A e B) e 70% (C, D, E). Diminuzione significativa nella soglia di reclutamento per le MU 25-50%MVC del gruppo CONV per la rampa 35%MVC.

3.2.2 Soglia di dereclutamento (%)

La soglia di dereclutamento (relativa) indica la percentuale del livello di forza al di sotto del quale un'unità motoria attivata durante la contrazione cessa di essere attiva. Per la rampa al 35%, nelle MU 0-25%MVC (Figura 3.3A) non sono emerse differenze statisticamente significative; l'analisi post-hoc ha mostrato un effetto tempo significativo nelle MU 25-50%MVC (Figura 3.3B) per entrambi i gruppi: nel gruppo CONV la soglia di dereclutamento è aumentata passando da $24.8\%MVC \pm 1.77$ a

27.6%MVC±1.77 con $p=0.0024$; mentre per ECC da 27.2%MVC±1.78 a 29.3%MVC±1.76 con $p=0.0188$. Per la rampa al 70%MVC, nel gruppo CONV è stata trovata una diminuzione significativa ($p=0.0416$) della soglia di dereclutamento esclusivamente per le unità motorie ad alta soglia (*Figura 3.3E*) raggiungendo un valore medio di 55.2%MVC±2.48 (al PRE corrispondeva un valore medio di 59.8%MVC±2.34).

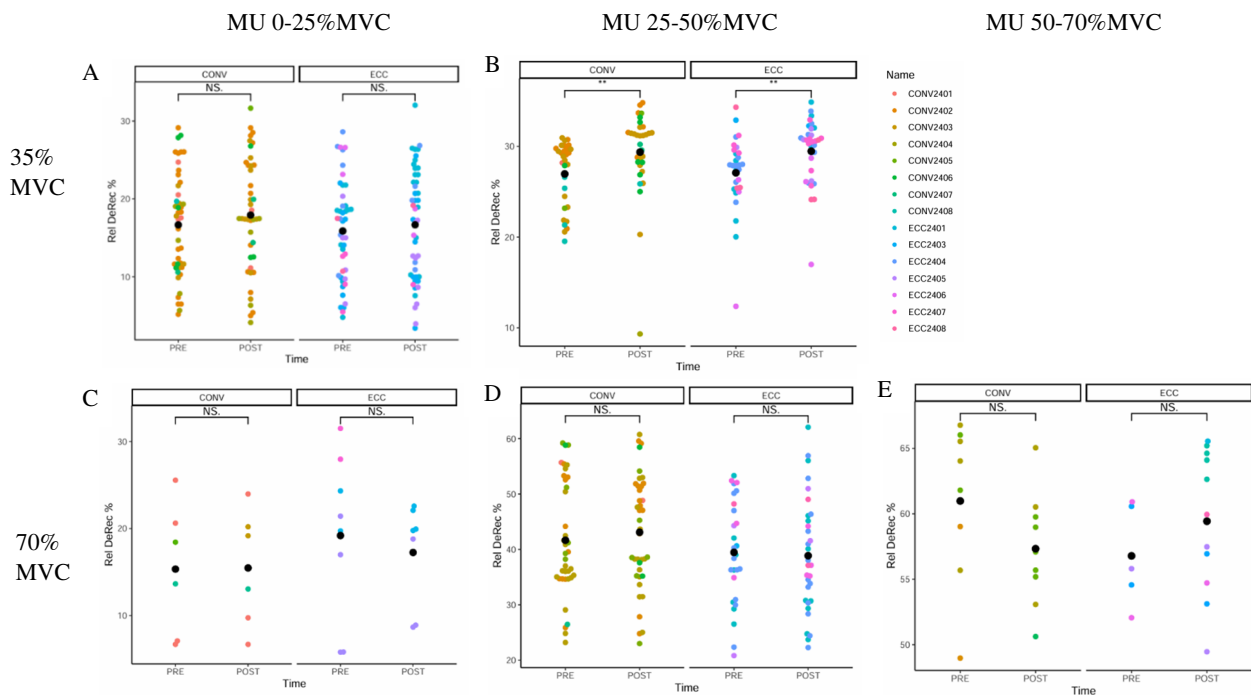


Figura 3.3. Soglia di dereclutamento in %MVC relativa alla rampa 35%MVC (A e B) e 70% (C, D, E). Aumento significativo nella soglia di dereclutamento per le MU 25-50%MVC di entrambi i gruppi per la rampa 35%MVC. Diminuzione significativa per le unità motorie ad alta soglia del gruppo CONV per la rampa 70%MVC.

3.2.3 Frequenza di scarica al reclutamento (pps)

La frequenza di scarica al reclutamento in pulse per second (pps) è la frequenza con cui i potenziali d'azione vengono inviati dal motoneurone alle fibre muscolari che innerva, specificatamente durante la fase di reclutamento delle unità motorie. Per la rampa a intensità 35%, non è stata trovata nessuna differenza significativa nella frequenza di scarica al reclutamento per il gruppo CONV (*Figura 3.4A e B*). Alla rampa di questa intensità è da segnalare un aumento significativo della frequenza di scarica al reclutamento per le MU a media soglia del gruppo ECC ($p=0.0495$, da 8.75pps±0.83 a 9.69pps±0.818) (*Figura 3.4B*). Per la rampa a intensità 70%MVC, l'analisi non ha rilevato nessun cambiamento statisticamente significativo nella frequenza di scarica al reclutamento sia tra gruppi che tra PRE e POST (*Figura 3.4C, D e E*).

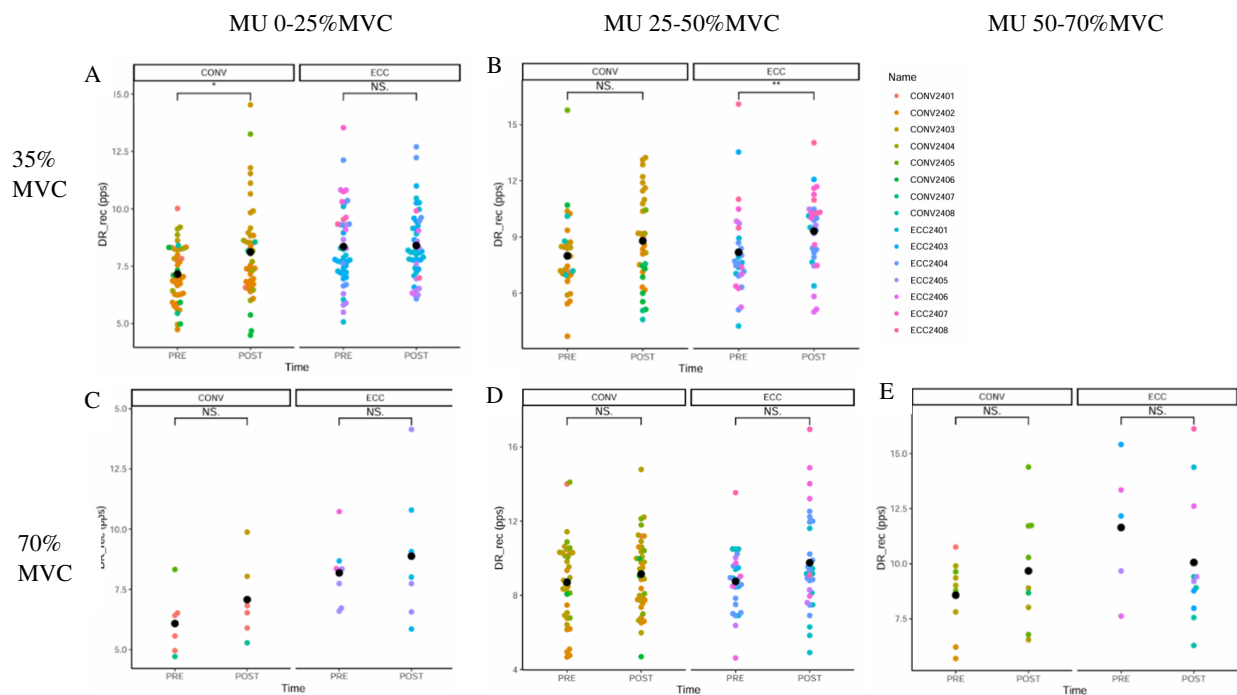
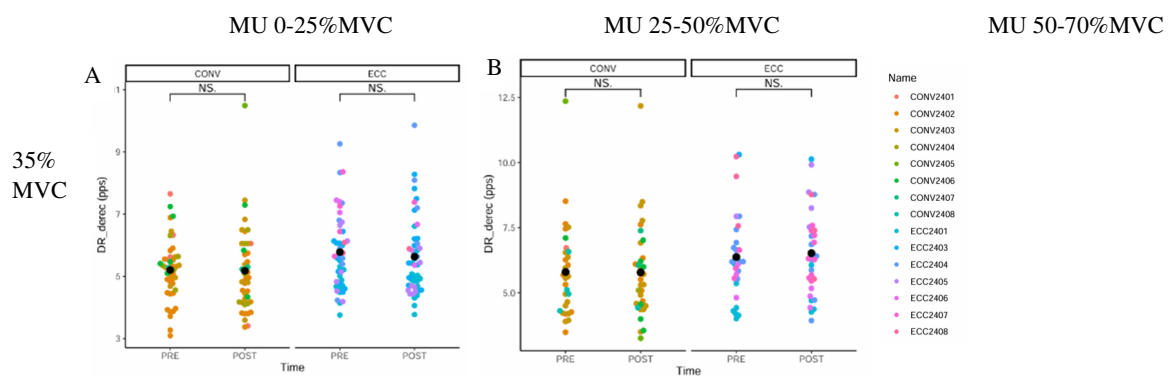


Figura 3.4. In figura sono rappresentati i cambiamenti nella DR al reclutamento (in pps) per la rampa al 35%MVC (A, B) e 70%MVC (C, D, E). Aumento significativo nella DR al reclutamento per le MU 25-50%MVC del gruppo ECC per la rampa 35%MVC.

3.2.4 Frequenza di scarica al dereclutamento (pps)

La frequenza di scarica al dereclutamento in pulse per second (pps) è la frequenza con cui i potenziali d'azione vengono inviati dal motoneurone alle fibre muscolari che innerva, specificatamente durante la fase di dereclutamento delle unità motorie. L'analisi statistica non ha individuato nessuna variazione significativa nella frequenza di scarica al dereclutamento (Figura 3.5).



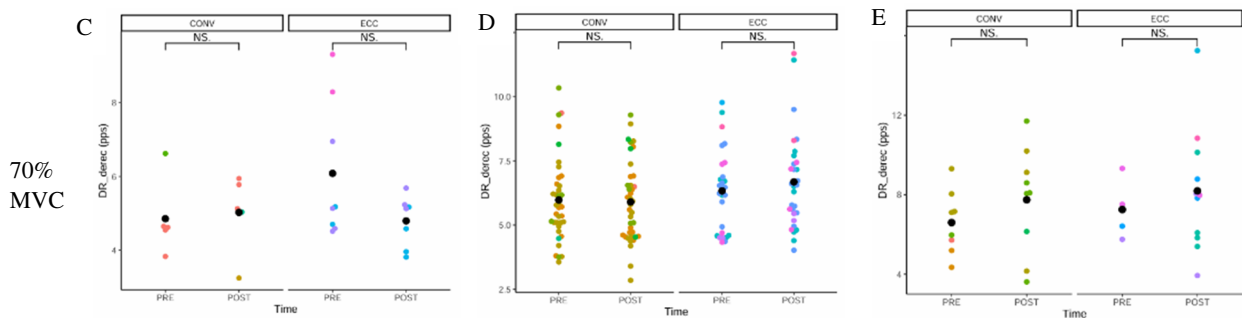
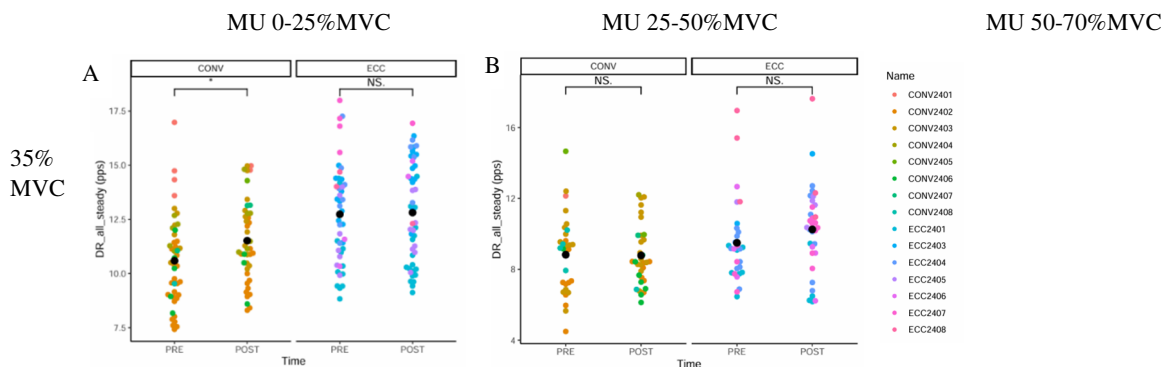


Figura 3.5. Frequenza di scarica al dereclutamento (in pps) relativa alla rampa 35%MVC (A e B) e 70% (C, D, E). Nessuna variazione statisticamente significativa nella DR al dereclutamento.

3.2.5 Frequenza di scarica steady state (pps)

La frequenza di scarica steady state in pulse per second (pps) è la frequenza con cui i potenziali d'azione vengono inviati dal motoneurone alle fibre muscolari che innerva durante la fase di steady state delle rampe di contrazione trapezoidali. Per la rampa di intensità 35%MVC, un aumento significativo della DR steady state tempo dipendente per le unità motorie a bassa soglia (Figura 3.6A) è stato trovato sia per il gruppo CONV ($p=0.0354$) che per il gruppo ECC ($p=0.0192$) passando rispettivamente da PRE $11.5\text{pps}\pm 0.73$ e $13.2\text{pps}\pm 0.75$ a POST $12.2\text{pps}\pm 0.73$ e $13.9\text{pps}\pm 0.75$. Nessuna differenza statisticamente significativa per le unità motorie a media soglia (Figura 3.6B). A intensità 70%MVC, per le MU 0-25%MVC (Figura 3.6C) non c'è stata nessuna differenza significativa tra i gruppi e tra PRE e POST, nelle unità motorie a media e alta soglia è da segnalare una differenza significativa rispetto al gruppo a favore del gruppo ECC rispettivamente di $4.62\text{pps}\pm 1.99$ con $p=0.0461$ e di $6.35\text{pps}\pm 2.01$ con $p=0.009$. Inoltre, per le MU 25-50%MVC (Figura 3.6D) è stato trovato un aumento significativo nella DR steady state per il gruppo CONV ($P=0.0134$) nella condizione PRE ($14.8\text{pps}\pm 1.41$) e POST ($15.8\text{pps}\pm 1.41$) e per le MU 50-70%MVC (Figura 3.6E) un aumento statisticamente significativo tempo dipendente per il gruppo CONV (da $10.9\text{pps}\pm 1.43$ a $14.2\text{pps}\pm 1.45$, $p=0.0002$).



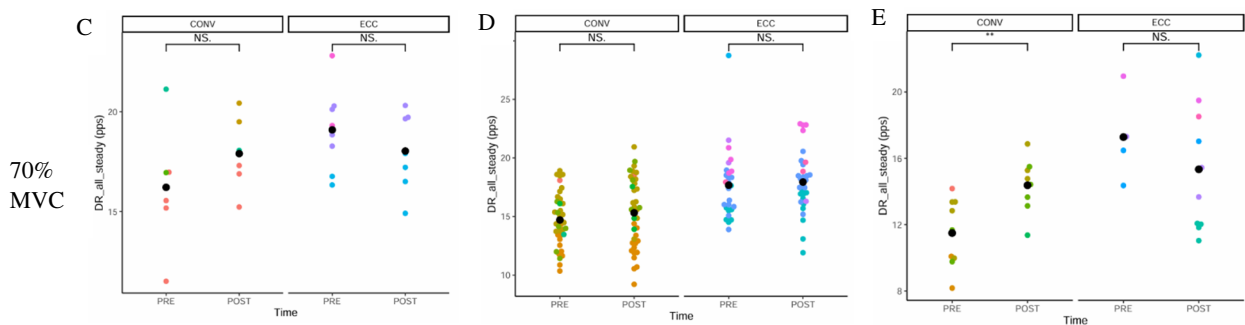


Figura 3.6. Cambiamenti nella DR durante la steady state (in pps) per la rampa al 35%MVC (A, B) e al 70%MVC (C, D, E). Aumento significativo della frequenza di scarica durante la steady state per le MU a bassa soglia di entrambi i gruppi per la rampa 35%MVC. Aumento significativo anche per le MU 25-50% e 50-70% per il gruppo CONV nella rampa 70%MVC.

3.2.7 Velocità di conduzione (m/s)

La velocità di conduzione del segnale misurata in m/s si riferisce alla rapidità con cui l'impulso nervoso si propaga lungo le fibre muscolari a partire dal punto motore. Variazioni nella velocità di conduzione non sono state trovate per la rampa trapezoidale al 35%MVC (Figura 3.7A e B). Da segnalare per la rampa al 70%MVC è un aumento significativo della CV tempo dipendente per le unità motorie ad alta soglia (Figura 3.7E) del gruppo CONV ($p=0.0431$) da $4.93\text{m/s}\pm 0.2$ a $5.31\text{m/s}\pm 0.2$.

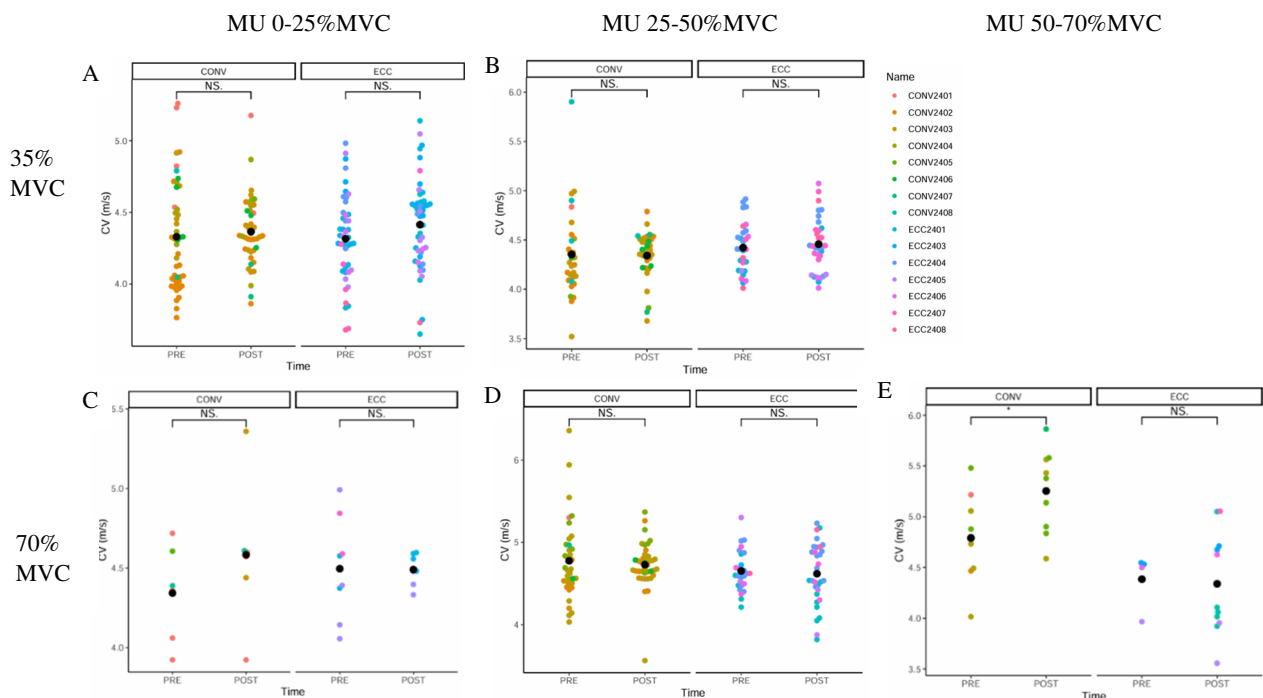


Figura 3.7. In figura sono rappresentati i cambiamenti nella velocità di conduzione (CV) in m/s per le MU delle rampe 35%MVC (A, B) e 70%MVC (C, D, E). Aumento significativo per le unità motorie ad alta soglia del gruppo CONV.

4. DISCUSSIONE

Lo scopo dello studio è stato quello di valutare se eguagliare l'attivazione neurale tra contrazione eccentrica e concentrica durante un programma di allenamento di forza con sovraccarico eccentrico avrebbe comportato cambiamenti distinti nel controllo neuromuscolare rispetto ad un allenamento convenzionale. La valutazione degli adattamenti nelle proprietà delle unità motorie è stata possibile grazie all'utilizzo della tecnica HDsEMG. Questa tecnica ha permesso di identificare e studiare gli adattamenti in popolazioni di MU in modo accurato e non invasivo. I risultati osservati confrontando i cambiamenti delle variabili analizzate tra i due time-point (PRE e POST) mostrano adattamenti distinti tra i due protocolli di allenamento. La massima contrazione volontaria (MVC) dei muscoli estensori di ginocchio misurata PRE e POST protocolli di allenamento è aumentata in modo significativo per il gruppo ECC; questo vuol dire che il protocollo di allenamento è stato efficace. A livello neurale, questo aumento di forza può essere stato dovuto a un aumento significativo della frequenza di scarica al reclutamento combinato all'aumento della soglia di dereclutamento per le unità motorie a media soglia. L'aumento della frequenza di scarica steady state è associato a un miglioramento dell'input neurale diretto alle fibre muscolari contenute nelle MU più piccole a bassa soglia di reclutamento. Anche il gruppo CONV ha fatto registrare un aumento della MVC, tuttavia non statisticamente significativo. Ciò può essere dovuto alla diminuzione significativa della soglia di dereclutamento delle MU ad alta soglia senza variazioni statisticamente significative nella frequenza di scarica al reclutamento. È da segnalare che il controllo motorio durante la fase di steady state è migliorato dopo l'aumento della frequenza di scarica in questa fase della contrazione. L'aumento nella velocità di conduzione delle MU ad alta soglia del gruppo CONV potrebbe significare che l'allenamento convenzionale abbia portato ad un maggiore utilizzo di fibre IIX nella produzione di forza.

4.1 MVC

Dopo 6 settimane di allenamento di forza, la MVC è aumentata in modo significativo dopo protocollo ECC, ma non dopo protocollo CONV. Questo risultato è in linea con l'ipotesi iniziale. Può essere che l'aumento della massima forza volontaria isometrica nel gruppo ECC sia dovuto all'aumento della frequenza di scarica al reclutamento combinata con l'aumento della soglia di dereclutamento per le unità motorie a media soglia. In questo modo aumenterebbe il reclutamento temporale assieme a un'attivazione più protratta nel tempo delle unità motorie a media soglia permettendo una gestione più accurata della forza e ritardando l'intervento delle unità motorie ad alta soglia. Per il gruppo CONV non è stato rilevato un aumento significativo della MVC, probabilmente perché nei risultati

di questo studio non è cambiata la frequenza di scarica al reclutamento. Tuttavia, in letteratura cambiamenti nella MVC dopo protocolli di allenamento di forza dalla durata di 6 o più settimane sono associati maggiormente a adattamenti strutturali del muscolo [30], in particolar modo ad un aumento della CSA delle fibre muscolari di tipo IIX [13]. La stimolazione meccanica maggiore durante la fase eccentrica per il gruppo ECC rispetto al gruppo CONV ha permesso un adattamento neuromuscolare differente (potrebbe aver permesso anche un adattamento strutturale distinto correlato anche alla relazione tensione-lunghezza muscolare) che si è tradotto in un maggior aumento di forza dei muscoli estensori di ginocchio per l'angolo di flessione di ginocchio a 90° a favore del gruppo ECC.

4.2 Soglia di reclutamento e soglia di dereclutamento

La soglia di reclutamento/dereclutamento corrisponde al valore di forza, espresso in termini assoluti o relativi (%MVC), in cui l'unità motoria viene attivata/deattivata durante la contrazione. Gli articoli di Del Vecchio e colleghi [20] e Casolo e colleghi [17], hanno riportato un abbassamento della soglia di reclutamento relativa (rispettivamente da 26 a 21%MVC e da 32 a 27%MVC) in seguito a 4 settimane di allenamento isometrico e balistico. In questo studio, è stata osservata una diminuzione della soglia di reclutamento relativa delle MU a media soglia per il gruppo CONV. Ciò significa che a parità di forza relativa le unità motorie a media soglia vengono reclutate prima. Secondo Del Vecchio e colleghi [20] questo è attribuibile ad un aumento della latenza tra attivazione neurale e generazione di forza. Al contrario dello studio [20] che non ha trovato modificazioni nella soglia di dereclutamento, in questo studio è stato osservato un aumento della soglia di dereclutamento relativa sia per il gruppo ECC che per il gruppo CONV per le unità motorie a media soglia. Questo potrebbe implicare un cambiamento delle strategie di dereclutamento indotto dall'allenamento di forza: a parità di forza relativa, le unità motorie sembrano deattivarsi a percentuali maggiori di forza. Stranamente, lo stesso comportamento non è attribuibile alle unità motorie ad alta soglia, le quali hanno subito una diminuzione della soglia di dereclutamento nel gruppo CONV. Questo risultato può in parte spiegare l'aumento maggiore della MVC nel gruppo ECC: per il gruppo CONV una diminuzione della soglia di dereclutamento delle unità motorie ad alta soglia potrebbe essersi tradotta in una peggiore capacità di mantenere elevata la forza ad alte percentuali.

4.3 Frequenza di scarica al reclutamento, dereclutamento, steady state

La DR al reclutamento ha mostrato un aumento significativo solo per il gruppo ECC, mentre la DR durante la steady state è aumentata in modo significativo per le MU a bassa soglia nel gruppo ECC e in tutte le unità motorie nel gruppo CONV. Nella fase di dereclutamento, ossia di progressiva

disattivazione delle UM al fine di ridurre la forza muscolare, non sono stati riscontrati cambiamenti significativi in seguito ai protocolli di allenamento. A differenza dello studio di Balshaw e colleghi [9], in questo studio l'allenamento con EO non ha indotto nessun miglioramento per le MU ad alta soglia. È stato osservato un miglioramento dell'input neurale (frequenza di scarica) diretto alle fibre muscolari contenute nelle MU più piccole a bassa soglia di reclutamento durante le prime fasi della contrazione. Nel protocollo CONV, l'aumento della DR durante la steady state è in accordo con la letteratura presente, [20], [21]. Tuttavia, Kamen & Knight [14] non hanno osservato variazioni nella DR in contrazioni submassimali. Ulteriori studi saranno fondamentali per comprendere meglio il comportamento delle unità motorie ad alta soglia dopo protocollo di allenamento di forza con EO.

4.4 Velocità di conduzione del segnale

È stato riscontrato un aumento significativo della velocità di conduzione delle MU ad alta soglia del gruppo CONV. Probabilmente questo può essere associato al fatto che vengano utilizzate fibre muscolari differenti per la produzione di forza: al posto di utilizzare fibre di tipo I, si potrebbero utilizzare maggiormente fibre di tipo II, più veloci e che sviluppano maggiore forza. Questa osservazione potrebbe trovare spiegazione dagli studi di alcuni autori [31], [32], i quali hanno scoperto che la CSA delle fibre di tipo II e IIX spiega gran parte della correlazione tra velocità di conduzione del segnale e velocità di sviluppo della forza. Tuttavia, rimane da comprendere perché la velocità di conduzione non abbia subito variazioni significative nel gruppo ECC.

4.5 Limitazioni

Questo studio ha permesso di monitorare alterazioni a livello neurale in cronico utilizzando l'HDsEMG. Questa tecnica consente di registrare e studiare l'attività, le proprietà e i cambiamenti relativi alle singole unità motorie. Nonostante queste premesse, lo studio presenta alcune limitazioni. Il campione includeva sia maschi che femmine (8M e 8F), tuttavia non è stata eseguita una sottoanalisi per identificare eventuali differenze di genere. Inoltre, il ridotto numero di unità motorie rilevate nella popolazione femminile e la difficoltà nella decomposizione dei segnali HDsEMG delle stesse, suggerirebbe di ricorrere ad un campione più numeroso rispetto a quello utilizzato per lo studio. In molti tra i parametri analizzati non sono state riscontrate variazioni significative tra PRE e POST protocolli di allenamento, ciò è attribuibile all'esiguo campione di partecipanti. Infine, la procedura di tracking delle singole unità motorie tra i due time-point non è stata analizzata. Questa analisi avrebbe permesso di individuare il cambiamento dei parametri di reclutamento e frequenza di scarica a livello delle stesse unità motorie identificate a distanza di 6 settimane.

5. CONCLUSIONE

L'allenamento con EO sembra essere un metodo efficace per favorire cambiamenti distinti nel controllo neuromuscolare rispetto all'allenamento convenzionale. I dati raccolti da questo gruppo di ricerca hanno prodotto risultati statisticamente significativi che sostengono un maggior aumento della MVC dopo allenamento con EO. Tuttavia, l'allenamento con EO non ha prodotto le variazioni aspettate nel comportamento delle unità motorie ad alta soglia. L'allenamento convenzionale ha fatto rilevare maggiori cambiamenti nel comportamento delle unità motorie a media e alta soglia rispetto all'allenamento con EO, soprattutto per quanto riguarda soglia di reclutamento, frequenza di scarica steady state e velocità di conduzione. L'insufficienza di dati che costituiscano una prova schiacciante per favorire l'allenamento con EO rispetto all'allenamento convenzionale sono da ricercare nel limitato campione di partecipanti e nel non aver eseguito una sottoanalisi per identificare differenze tra genere. I risultati ottenuti dimostrano quindi adattamenti specifici nel controllo neuromuscolare che dipendono dal tipo di allenamento svolto. Le caratteristiche biomeccaniche e neuromuscolari che contraddistinguono l'allenamento con EO rispetto all'allenamento convenzionale aggiunte al minor costo energetico della contrazione eccentrica, permettono di identificare alcune popolazioni che potrebbero beneficiare maggiormente dell'allenamento con EO. In particolare, negli anziani e in popolazioni di infortunati (di qualsiasi genere, da sedentari al return to play dell'atleta) la possibilità di eseguire un allenamento di forza attivando maggiormente il sistema nervoso e con maggior tensione meccanica nella fase eccentrica del movimento offre un maggior stimolo alla produzione di forza del distretto muscolare coinvolto. Nel futuro andrebbero implementate delle valutazioni intermedie (a diverse time-line) delle proprietà delle unità motorie in modo da chiarire definitivamente ciò che avviene successivamente alle primissime settimane di allenamento con EO (da 2 a 3) anche in relazione all'aumento di forza differente rispetto all'allenamento convenzionale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] B. Katz, “THE RELATION BETWEEN FORCE AND SPEED IN MUSCULAR CONTRACTION,” 1939.
- [2] J. Duchateau and R. M. Enoka, “Neural control of lengthening contractions,” Jan. 01, 2016, *Company of Biologists Ltd*. doi: 10.1242/jeb.123158.
- [3] U. Proske and D. L. Morgan, “Muscle damage from eccentric exercise: Mechanism, mechanical signs, adaptation and clinical applications,” Dec. 01, 2001. doi: 10.1111/j.1469-7793.2001.00333.x.
- [4] M. V. Franchi, N. D. Reeves, and M. V. Narici, “Skeletal muscle remodeling in response to eccentric vs. concentric loading: Morphological, molecular, and metabolic adaptations,” Jul. 04, 2017, *Frontiers Media S.A.* doi: 10.3389/fphys.2017.00447.
- [5] N. D. Reeves, C. N. Maganaris, S. Longo, and M. V. Narici, “Differential adaptations to eccentric versus conventional resistance training in older humans,” *Exp Physiol*, vol. 94, no. 7, pp. 825–833, 2009, doi: 10.1113/expphysiol.2009.046599.
- [6] M. V. Franchi and N. A. Maffiuletti, “Distinct modalities of eccentric exercise: Different recipes, not the same dish,” 2019, *American Physiological Society*. doi: 10.1152/jappphysiol.00093.2019.
- [7] J. G. Semmler, “Motor unit activity after eccentric exercise and muscle damage in humans,” *Acta Physiologica*, vol. 210, no. 4, pp. 754–767, 2014, doi: 10.1111/apha.12232.
- [8] H. Piitulainen, A. Holobar, and J. Avela, “Changes in motor unit characteristics after eccentric elbow flexor exercise,” *Scand J Med Sci Sports*, vol. 22, no. 3, pp. 418–429, Jun. 2012, doi: 10.1111/j.1600-0838.2010.01228.x.
- [9] T. G. Balshaw, M. Pahar, R. Chesham, L. J. Macgregor, and A. M. Hunter, “Reduced firing rates of high threshold motor units in response to eccentric overload,” *Physiol Rep*, vol. 5, no. 2, Jan. 2017, doi: 10.14814/phy2.13111.
- [10] J. P. Wagle *et al.*, “Accentuated Eccentric Loading for Training and Performance: A Review,” Dec. 01, 2017, *Springer International Publishing*. doi: 10.1007/s40279-017-0755-6.

- [11] M. V. Franchi, P. J. Atherton, C. N. Maganaris, and M. V. Narici, “Fascicle length does increase in response to longitudinal resistance training and in a contraction-mode specific manner,” Dec. 01, 2016, *SpringerOpen*. doi: 10.1186/s40064-015-1548-8.
- [12] J. I. Quinlan *et al.*, “Muscle and tendon adaptations to moderate load eccentric vs. concentric resistance exercise in young and older males,” *Geroscience*, vol. 43, no. 4, pp. 1567–1584, Aug. 2021, doi: 10.1007/s11357-021-00396-0.
- [13] B. Friedmann-Bette *et al.*, “Effects of strength training with eccentric overload on muscle adaptation in male athletes,” *Eur J Appl Physiol*, vol. 108, no. 4, pp. 821–836, Mar. 2010, doi: 10.1007/s00421-009-1292-2.
- [14] G. Kamen and C. A. Knight, “Training-Related Adaptations in Motor Unit Discharge Rate in Young and Older Adults,” 2004. [Online]. Available: <https://academic.oup.com/biomedgerontology/article/59/12/1334/538642>
- [15] A. J. Sterczala, J. D. Miller, H. L. Dimmick, M. E. Wray, M. A. Trevino, and T. J. Herda, “Eight weeks of resistance training increases strength, muscle cross-sectional area and motor unit size, but does not alter firing rates in the vastus lateralis,” *Eur J Appl Physiol*, vol. 120, no. 1, pp. 281–294, Jan. 2020, doi: 10.1007/s00421-019-04273-9.
- [16] O. Hayman *et al.*, “Changes in motor unit behaviour across repeated bouts of eccentric exercise,” *Exp Physiol*, Sep. 2024, doi: 10.1113/EP092070.
- [17] A. Casolo, D. Farina, D. Falla, I. Bazzucchi, F. Felici, and A. Del Vecchio, “Strength Training Increases Conduction Velocity of High-Threshold Motor Units,” *Med Sci Sports Exerc*, vol. 52, no. 4, pp. 955–967, Apr. 2020, doi: 10.1249/MSS.0000000000002196.
- [18] C. J. Heckman and R. M. Enoka, “Motor unit,” *Compr Physiol*, vol. 2, no. 4, pp. 2629–2682, 2012, doi: 10.1002/cphy.c100087.
- [19] A. Del Vecchio, A. Holobar, D. Falla, F. Felici, R. M. Enoka, and D. Farina, “Tutorial: Analysis of motor unit discharge characteristics from high-density surface EMG signals,” *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 53, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.jelekin.2020.102426.

- [20] A. Del Vecchio *et al.*, “The increase in muscle force after 4 weeks of strength training is mediated by adaptations in motor unit recruitment and rate coding,” *Journal of Physiology*, vol. 597, no. 7, pp. 1873–1887, Apr. 2019, doi: 10.1113/JP277250.
- [21] T. Hirono, S. Kunugi, A. Yoshimura, A. Holobar, and K. Watanabe, “Acute changes in motor unit discharge property after concentric versus eccentric contraction exercise in knee extensor,” *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 67, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.jelekin.2022.102704.
- [22] A. Botter, G. Oprandi, F. Lanfranco, S. Allasia, N. A. Maffiuletti, and M. A. Minetto, “Atlas of the muscle motor points for the lower limb: Implications for electrical stimulation procedures and electrode positioning,” *Eur J Appl Physiol*, vol. 111, no. 10, pp. 2461–2471, Oct. 2011, doi: 10.1007/s00421-011-2093-y.
- [23] F. Hug, A. Del Vecchio, S. Avrillon, D. Farina, K. Tucker, and A. Del Vecchio, “Muscles from the same muscle group do not necessarily share common drive: evidence from the human triceps surae,” *J Appl Physiol*, vol. 2021, no. 2, 2021, doi: 10.1152/jappphysiol.00635.2020.
- [24] G. Borg, “Borg’s Perceived Exertion And Pain Scales,” 1998. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/306039034>
- [25] M. Brzycki, “Strength Testing—Predicting a One-Rep Max from Reps-to-Fatigue,” *J Phys Educ Recreat Dance*, vol. 64, no. 1, pp. 88–90, Jan. 1993, doi: 10.1080/07303084.1993.10606684.
- [26] F. Negro, S. Muceli, A. M. Castronovo, A. Holobar, and D. Farina, “Multi-channel intramuscular and surface EMG decomposition by convolutive blind source separation,” *J Neural Eng*, vol. 13, no. 2, Feb. 2016, doi: 10.1088/1741-2560/13/2/026027.
- [27] D. Farina and A. Holobar, “Characterization of Human Motor Units from Surface EMG Decomposition,” Feb. 01, 2016, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* doi: 10.1109/JPROC.2015.2498665.
- [28] A. Holobar, M. A. Minetto, and D. Farina, “Accurate identification of motor unit discharge patterns from high-density surface EMG and validation with a novel signal-based performance metric,” *J Neural Eng*, vol. 11, no. 1, Feb. 2014, doi: 10.1088/1741-2560/11/1/016008.

- [29] G. Valli, P. Ritsche, A. Casolo, F. Negro, and G. De Vito, “Tutorial: Analysis of central and peripheral motor unit properties from decomposed High-Density surface EMG signals with openhdemg,” *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 74, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.jelekin.2023.102850.
- [30] B. M. Baroni, R. Rodrigues, R. A. Franke, J. M. Geremia, D. E. Rassier, and M. A. Vaz, “Time course of neuromuscular adaptations to knee extensor eccentric training,” *Int J Sports Med*, vol. 34, no. 10, pp. 904–911, 2013, doi: 10.1055/s-0032-1333263.
- [31] S. Methenitis, N. Karandreas, K. Spengos, N. Zaras, A. N. Stasinaki, and G. Terzis, “Muscle Fiber Conduction Velocity, Muscle Fiber Composition, and Power Performance,” *Med Sci Sports Exerc*, vol. 48, no. 9, pp. 1761–1771, Sep. 2016, doi: 10.1249/MSS.0000000000000954.
- [32] X. A. Del Vecchio *et al.*, “Higher muscle fiber conduction velocity and early rate of torque development in chronically strength-trained individuals,” *J Appl Physiol*, vol. 125, pp. 1218–1226, 2018, doi: 10.1152/jappphysiol.00025.2018.-Strength-trained.