



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Scienze Biomediche

Corso di Laurea Triennale in Scienze Motorie

Tesi di Laurea

**CONFRONTO TRA ALLENAMENTO DI FORZA CON O SENZA
SOVRACCARICO ECCENTRICO: ANALISI DEGLI ADATTAMENTI
NEUROMUSCOLARI TRAMITE ELETTROMIOGRAFIA AD ALTA DENSITA'
(HDsEMG) DOPO 6 SETTIMANE DI ALLENAMENTO**

Relatore: Prof. Franchi Martino

Correlatore: Prof. Martino Giovanni

Laureando: Tomasi Giulia

N° di matricola: 2081570

Anno Accademico 2023/2024

*A chi mi è sempre stato vicino, a chi ha sempre
creduto in me e in quello che più mi piaceva*

INDICE

ABSTRACT	3
1. INTRODUZIONE	4
1.1 Differenza tra contrazione muscolare concentrica ed eccentrica.....	4
1.2 Allenamento di forza con sovraccarico eccentrico.....	4
1.3 Adattamenti neurali in seguito allenamento di forza con sovraccarico eccentrico.....	5
1.4 HDsEMG.....	5
1.5. Ipotesi dei risultati.....	6
2. MATERIALI E METODI	6
2.1 Partecipanti.....	6
2.2 Disegno sperimentale.....	7
2.3. Protocollo sperimentale.....	8
2.3.1 Protocollo allenamento convenzionale (RT).....	8
2.3.2 Protocollo allenamento con sovraccarico eccentrico (EO).....	9
2.4. Analisi HDsEMG.....	11
2.4.1 Protocollo analisi HDsEMG.....	11
2.4.2 Data processing HDsEMG.....	12
2.5 Analisi statistica.....	14
3. RISULTATI	14
3.1 MVC.....	15
3.2 Proprietà delle unità motorie.....	15
4. DISCUSSIONE	22

4.1	Discussione dei risultati.....	22
4.1.1	<i>Cambiamenti dell'MVC.....</i>	22
4.1.2	<i>Variazioni nella soglia di reclutamento e di dereclutamento.....</i>	23
4.1.3	<i>Variazioni nella frequenza di scarica al reclutamento e al dereclutamento.....</i>	24
4.1.4	<i>Variazione della frequenza di scarica allo steady state.....</i>	24
4.1.5	<i>Cambiamento nella velocità di conduzione.....</i>	25
4.2	Limitazioni.....	26
5.	CONCLUSIONI.....	26
	BIBLIOGRAFIA.....	28

ABSTRACT

La capacità di forza del muscolo scheletrico è maggiore durante la contrazione eccentrica rispetto alla contrazione concentrica. Tuttavia, la maggior parte degli esercizi di resistenza convenzionali utilizza un carico costante per entrambe le fasi della contrazione, portando a un sottoutilizzo della fase eccentrica ed un minor numero di unità motorie reclutate rispetto alla fase concentrica. Per queste ragioni, un allenamento con sovraccarico eccentrico potrebbe ottimizzare il reclutamento muscolare in entrambe le fasi di contrazione e portare a diversi adattamenti neuromuscolari rispetto ad un allenamento di tipo convenzionale. In questo studio, 16 giovani adulti sani (8 femmine e 8 maschi con età compresa tra i 18 e 30 anni) sono stati divisi in due gruppi dove hanno svolto due protocolli di allenamento differenti, uno con sovraccarico eccentrico e uno convenzionale, per un periodo di 6 settimane, con 3 sedute settimanali utilizzando una Legpress. Come metodo innovativo di analisi, è stata utilizzata l'elettromiografia di superficie ad alta densità (HDsEMG), che a partire dai segnali HDsEMG è possibile, attraverso algoritmi di decomposizione, valutare l'attività elettrica delle singole unità motorie. In conclusione, da questo studio ci aspettiamo che gli adattamenti neurali diventino stabili dopo l'allenamento, contribuendo all'incremento di forza muscolare rispetto all'allenamento convenzionale. L'obiettivo è quello di introdurre nuovi protocolli e metodologie di allenamento con sovraccarico eccentrico per diverse tipologie di soggetti della popolazione, tra cui: atleti per aumentare la performance, soggetti post-operatorio per velocizzare il recupero, anziani per avere maggiori risultati in breve tempo e con maggiore sicurezza.

1. INTRODUZIONE

Le contrazioni muscolari eccentriche e concentriche sono due tipologie di contrazioni che avvengono nei muscoli scheletrici con lo scopo di generare movimento e provocare una variazione dell'angolo articolare (Franchi et al., 2017). Entrambe le contrazioni sono fondamentali per il controllo motorio e l'esecuzione di movimenti, nonché a svolgere attività fisiche, ma esse differiscono dal punto fisiologico, meccanico, metabolico e neurale (Tetsuya Hirono et al., 2022; Franchi et al., 2017). La forza muscolare è la capacità del muscolo scheletrico di generare forza contro una resistenza/carico esterno, risultato dell'interazione tra i filamenti contrattili (Franchi et al., 2017). Questa può essere espressa sia concentricamente che eccentricamente. Nella contrazione concentrica il muscolo si accorcia per generare forza vincendo la resistenza esterna imposta; invece, nella contrazione eccentrica il muscolo si allunga mentre genera forza opponendosi ad un carico esterno (Kelsi Kowalchuk & Scotty Butcher, 2019). Si è visto che i due tipi di contrazione comportano meccanismi differenti di generazione della forza (Franchi et al., 2017). Le contrazioni muscolari eccentriche possono produrre una maggiore forza muscolare rispetto alle contrazioni muscolari concentriche a parità di carico e condizioni, con il vantaggio di avere un minor dispendio energetico, in quanto richiedono meno utilizzo di ATP (Balshaw et al., 2016). Questo meccanismo è dovuto sia a fattori meccanici e fisiologici, come al maggior coinvolgimento delle componenti elastiche e alla morfologia e architettura del muscolo scheletrico, sia a fattori neurali, come l'attività elettrica e le proprietà delle unità motorie (Tiril Tøien & Håvard Pedersen Haglo et al., 2018). Tuttavia, la maggior parte degli esercizi di forza convenzionali utilizza un carico costante per entrambe le fasi della contrazione, portando a un sottoutilizzo della fase eccentrica in confronto alla concentrica (Balshaw et al., 2016).

Appurato che la capacità di forza del muscolo scheletrico è maggiore durante la contrazione eccentrica rispetto alla contrazione concentrica, l'allenamento con sovraccarico eccentrico ECC, potrebbe ottimizzare l'espressione della forza nelle contrazioni eccentriche, permettendo la comparazione dei livelli di forza fra la contrazione in accorciamento e in allungamento (Tiril Tøien & Håvard Pedersen Haglo et al., 2018; Martino et al., 2024). Nello specifico, l'allenamento con sovraccarico eccentrico ECC consiste nel fornire un carico maggiore durante la fase eccentrica che nella fase concentrica, a differenza di un allenamento convenzionale CONV, dove il carico rimane costante in entrambe le fasi (Balshaw et al., 2016; Tiril Tøien & Håvard Pedersen Haglo et al., 2018).

Questo miglioramento può essere attribuito sia a fattori morfologici che ad adattamenti neurali, ma in quest'ultimo caso si conosce ancora poco (Duchateau & Enoka, 2016).

Le ipotesi indagate ad oggi sugli adattamenti neurali dovuti all'utilizzo del sovraccarico eccentrico ECC sono diverse. Una di queste osserva che i soggetti quando compiono azioni isocinetiche massimali, l'ampiezza dell'EMG, ovvero il segnale elettromiografico che viene registrato con elettrodi di superficie, è nella maggior parte delle volte inferiore nelle contrazioni eccentriche rispetto le concentriche ed isometriche, eseguite con le medesime modalità (Duchateau & Enoka, 2016). Pertanto, si può notare un deficit nell'attivazione volontaria nelle contrazioni in allungamento. Per ovviare al problema, si è constatato che questo deficit può essere ridotto con l'allenamento con sovraccarico eccentrico, e in generale rimosso negli atleti altamente allenati (Duchateau & Enoka 2016). A motivare queste rivelazioni, un altro studio basato sull'allenamento con sovraccarico eccentrico ECC, (Balshaw et al., 2016), ha dedotto che i meccanismi neurali responsabili di un incremento della forza, siano dovuti al fatto che durante le contrazioni eccentriche il muscolo e i fusi neuromuscolari si allungano, aumentando le scariche afferenti neurali al sistema nervoso centrale per incrementare il reclutamento delle unità motorie nel muscolo che sta lavorando, con lo scopo di generare più forza. Più precisamente, è stato riscontrato che nei soggetti non allenati, l'adattamento eccentrico sia avvenuto per la maggior parte dal danno muscolare, mentre nei soggetti allenati, si pensa che il danno muscolare sia minore, in quanto maggiormente sottoposti alle contrazioni eccentriche (Balshaw et al., 2016). Perciò, è stato suggerito dallo studio di (Balshaw et al., 2016) che nei soggetti allenati l'incremento di forza, in seguito all'allenamento con sovraccarico eccentrico ECC, sia causato, con molta probabilità, da meccanismi neurali piuttosto che morfologici.

In questo studio abbiamo voluto investigare gli adattamenti neurali ad allenamento con sovraccarico eccentrico utilizzando l'innovativa tecnica dell'elettromiografia di superficie ad alta densità (HDsEMG) (Holobar & Zazula, 2004, 2008). Essa si basa sull'utilizzo di una matrice di elettrodi di superficie ad alta densità, ovvero una griglia con elettrodi posti vicini tra loro posti superficialmente al muscolo scheletrico interessato, per rilevarne l'attività elettrica con una risoluzione spaziale maggiore rispetto all'EMG tradizionale, utile per la comprensione dei segnali neuromodulatori, usati in più campi quali: la biomeccanica del movimento, per la diagnosi e controllo di patologie neuromuscolari, per la valutazione della funzionalità muscolare dopo infortunio (Holobar & Zazula., 2004, 2008; Martino et al., 2024). Nello specifico, a partire dai segnali HDsEMG è possibile,

attraverso algoritmi di decomposizione, valutare l'attività elettrica delle singole unità motorie e studiarne, dopo una successiva analisi, alcuni parametri che permettono di dare delle risposte sul comportamento neurale della contrazione eccentrica con sovraccarico rispetto alla concentrica (Del Vecchio et al., 2019, Martino et al., 2024).

Come ipotesi dei risultati ci aspettiamo che vi sia un maggiore incremento di forza muscolare con allenamento con sovraccarico eccentrico ECC rispetto al convenzionale CONV. Nello specifico, ci attendiamo dei cambiamenti nelle proprietà di attivazione delle unità motorie come input neurale dal sistema nervoso centrale ai muscoli periferici, ipotizzando un aumento della massima contrazione volontaria MVC, un incremento nel reclutamento delle unità motorie, soprattutto una maggiore frequenza di scarica del potenziale di azione, e un aumento della velocità di conduzione del segnale elettrico.

2. MATERIALI E METODI

2.1. Partecipanti

A questo studio hanno partecipato 16 soggetti, 8 maschi e 8 femmine, sani e moderatamente attivi. I partecipanti avevano un'età compresa tra i 18 e 35 anni e un B.M.I. compreso tra i 18,5 e i 26 kg/m. I criteri di inclusione posti per poter far parte di questo studio sono stati: possedere sanità mentale e fisica, praticare attività fisica non agonistica moderata fino a 2 volte a settimana, possedere certificato medico per attività fisica sportiva non agonistica. I criteri di esclusione che sono stati imposti sono stati: presenza di patologie croniche, essere sottoposti a trattamenti farmacologici, soffrire di diabete ed epilessia, aver avuto fratture nei 24 mesi precedenti lo studio, soffrire di disturbi neuromuscolari, avere un'altezza non compresa tra i 195 cm e i 155cm, praticare attività fisica agonistica, essere sedentari. I soggetti selezionati a partecipare all'esperimento sono stati trovati con la creazione di un annuncio telematico online con in breve la spiegazione del progetto di ricerca, e in allegato un Google Form da compilare e inviarci, con domande riguardanti le caratteristiche fisiche dei soggetti e i contatti da lasciare. Dopodiché sono state raggruppate tutte le risposte ricevute su un foglio Excel con i dati riguardanti ogni soggetto. In un secondo momento è stata fatta una selezione basata sui criteri di esclusione ed inclusione. Dopodiché i soggetti selezionati sono stati contattati per confermare la partecipazione al progetto. Una volta scelti i soggetti e aver organizzato gli incontri per poter iniziare

con lo studio, gli è stato somministrato un consenso informato scritto da firmare e il Global Physical Activity Questionnaire (GPAQ), che consiste in un questionario per la quantificazione degli abituali livelli di attività fisica.

Inoltre, i partecipanti hanno accettato di astenersi nel praticare esercizio fisico estenuante e, nello specifico, di allenare gli arti inferiori durante tutto il periodo dello studio per non inficiare i risultati finali, ed inoltre hanno accettato di svolgere gli allenamenti con almeno 24 ore di riposo tra una sessione e l'altra.

2.2. Disegno sperimentale

Il disegno sperimentale di questo studio, come prima cosa, si è basato sul dividere i partecipanti in 2 gruppi differenti in maniera omogenea ed in base alle loro caratteristiche fisiche e al sesso di appartenenza: un gruppo avrebbe svolto un protocollo di allenamenti convenzionale CONV mentre l'altro gruppo avrebbe svolto un protocollo di allenamenti con sovraccarico eccentrico ECC.

Come macchinario per gli allenamenti è stata utilizzata una Legpress modello REV del marchio Technogym (Fig.2). Questo macchinario consente di controllare il carico in eccentrico e concentrico avendo un motore elettromagnetico. Entrambi i protocolli hanno previsto 3 sessioni di allenamento a settimana con almeno 24 ore di riposo tra una e l'altra, svolti in modalità di esecuzione monolaterale sulla Legpress, per la durata complessiva di 6 settimane. Prima dell'inizio delle sessioni di allenamento e successivamente, alla conclusione delle 6 settimane, si sono svolti in laboratorio dei test sperimentali di valutazione del muscolo vasto laterale destro (VL) di ogni soggetto. I test di valutazione sui partecipanti sono stati eseguiti con elettromiografia di superficie ad alta densità (HDsEMG).



Fig.1 In figura è rappresentata la panoramica dello studio e del disegno sperimentale

2.3 Protocollo sperimentale

2.3.1 Protocollo allenamento convenzionale (CONV)

Il protocollo di allenamento convenzionale CONV è stato sottoposto ad 8 partecipanti dello studio. Nella pratica, il procedimento è stato quello di eseguire 3 sedute di allenamento a settimana distanziate l'una dall'altra almeno da 24 ore per un totale di 6 settimane. In ogni seduta di allenamento i soggetti dovevano eseguire 4 serie per 10 ripetizioni al 70% del massimale (1RM), con time under tension (TUT) in concentrica di 2 secondi e in eccentrica di 2 secondi, in modalità di esecuzione monolaterale con entrambi gli arti inferiori. All'inizio e alla fine di ogni seduta sono state somministrate ai soggetti la scala di Borg, necessario per valutare la percezione dello sforzo all'esercizio in modo soggettivo, e la scala di Soreness, per valutare la percezione soggettiva dell'indolenzimento.

Nella prima seduta della prima settimana abbiamo calcolato il massimale (1RM) di ogni soggetto, dopo aver eseguito direttamente con una funzione del macchinario, "Test del Rom Avanzato", la misura del range of motion (ROM), per avere l'ampiezza del movimento del singolo soggetto. Il calcolo del massimale è stato eseguito in 2 diverse modalità solo sull'arto inferiore destro: la prima consisteva nello stimarlo basandosi sull'esecuzione dalle 4 alle 6 ripetizioni, dove l'ultima ripetizione doveva essere molto vicina al cedimento, per trovare le 5RM, con al massimo 4 serie a disposizione per cercare il carico ideale, con pausa di recupero tra le serie di 3 minuti, e successivamente si inseriva il carico trovato in una formula per ottenere il massimale corretto.

La seconda modalità, quella diretta, si basava sull'eseguire con una sola serie di 3 ripetizioni massime impostate con una funzione specifica del macchinario, denominata "Test Isocinetico/Test di Forza Dinamica", che da solo poi calcolava il massimale ideale.

Dopo aver trovato il massimale (1RM) di ogni soggetto, veniva calcolato il carico di riscaldamento e allenante in base a 3 percentuali: 30%, 50%, 70% del massimale. La fase di riscaldamento consisteva nel compiere 10 ripetizioni con il 30% del carico massimo per arto inferiore, e successivamente 5 ripetizioni con il 50% del carico massimo sia con arto inferiore destro che sinistro.

Nella fase di allenamento i soggetti hanno fatto per entrambi gli arti inferiori 4 serie per 10 ripetizioni al 70% del massimale con 1.30" di pausa di recupero tra una serie e l'altra con TUT di 2 secondi in eccentrica e concentrica.

Ogni serie eseguita con l'arto inferiore destro è stata registrata tramite il macchinario per la valutazione di ulteriori parametri.

Con la conclusione della seduta si somministrava nuovamente la scala di Borg e la scala di Soreness. Per ogni prima seduta di allenamento di ogni settimana è stato ricalcolato, con le medesime modalità descritte sopra, il massimale (1RM) per la progressione del carico in seguito all'aumento di forza dopo le sessioni di allenamento.

In fine, per le ultime due settimane di allenamenti, la 5° e la 6° settimana, è stata aggiunta una serie allenante; quindi, i soggetti hanno svolto 5 serie per 10 ripetizioni per gamba al 70% del massimale. Inoltre, nell'ultima settimana è stato calcolato il massimale (1RM) sia nella prima sessione di allenamento che nell'ultima.

2.3.2 Protocollo allenamento con sovraccarico eccentrico (ECC)

Il protocollo di allenamento con sovraccarico eccentrico ECC è stato sottoposto ad 8 partecipanti dello studio. Nella pratica, il procedimento è stato quello di eseguire 3 sedute di allenamento a settimana distanziate l'una dall'altra almeno da 24 ore per un totale di 6 settimane. In ogni seduta di allenamento i soggetti dovevano eseguire 4 serie per 8 ripetizioni al 70% del massimale (1RM) e 50% in più del carico in concentrica durante la fase eccentrica, con time under tension (TUT) in concentrica di 2 secondi e in eccentrica di 2 secondi, in modalità di esecuzione monolaterale con entrambi gli arti inferiori. All'inizio e alla fine di ogni seduta sono state somministrate ai soggetti la scala di Borg, necessaria per valutare la percezione dello sforzo all'esercizio in modo soggettivo, e la scala di Soreness, per valutare la percezione soggettiva dell'indolenzimento.

Nella prima seduta della prima settimana abbiamo calcolato il massimale (1RM) di ogni soggetto, dopo aver eseguito direttamente con una funzione del macchinario, "Test del Rom Avanzato", la misura del range of motion (ROM), per avere l'ampiezza del movimento del singolo soggetto. Il calcolo del massimale è stato eseguito in 2 diverse modalità solo sull'arto inferiore destro: la prima consisteva nello stimarlo basandosi sull'esecuzione dalle 4 alle 6 ripetizioni, dove l'ultima ripetizione doveva essere molto vicina al cedimento, per trovare le 5RM, con al massimo 4 serie a disposizione per cercare il carico ideale, con pausa di recupero tra le serie di 3 minuti, e successivamente si inseriva il carico trovato in una formula per ottenere il massimale corretto.

La seconda modalità, quella diretta, si basava sull' eseguire con una sola serie di 3 ripetizioni massime impostate con una funzione specifica del macchinario, denominata "Test Isocinetico/Test di Forza Dinamica" che da solo poi calcolava il massimale ideale.

Dopo aver trovato il massimale (1RM) di ogni soggetto, veniva calcolato il carico di riscaldamento e allenante in base a 3 percentuali: 30%, 50%, 70% del massimale. La fase di riscaldamento consisteva nel compiere 10 ripetizioni con il 30% del carico massimo per arto inferiore, e successivamente 5 ripetizioni con il 50% del carico massimo sia con arto inferiore destro che sinistro.

Nella fase di allenamento i soggetti hanno fatto per entrambi gli arti inferiori 4 serie per 8 ripetizioni al 70% del massimale in fase concentrica, e 50% in più del 70% del massimale in fase eccentrica, con 1.30" di pausa di recupero tra una serie e l'altra, e mantenendo un TUT di 2 secondi in eccentrica e concentrica.

Ogni serie eseguita con l'arto inferiore destro è stata registrata tramite il macchinario per la valutazione di ulteriori parametri.

Con la conclusione della seduta si somministrava nuovamente la scala di Borg e la scala di Soreness. Per ogni prima seduta di allenamento di ogni settimana è stato ricalcolato, con le medesime modalità descritte sopra, il massimale (1RM) per la progressione del carico in seguito all'aumento di forza dopo le sessioni di allenamento.

In fine, per le ultime due settimane di allenamenti, la 5° e la 6° settimana, è stata aggiunta una serie allenante; quindi, i soggetti hanno svolto 5 serie per 8 ripetizioni per gamba al 70% del massimale in fase concentrica e 50% in più del 70% del massimale in fase eccentrica. Inoltre, nell'ultima settimana è stato calcolato il massimale (1RM) sia nella prima sessione di allenamento che nell'ultima.

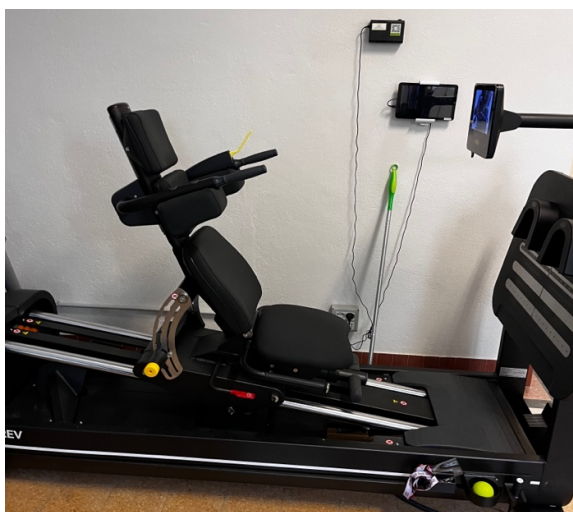


Fig.2 In figura è rappresentata la Leg press Technogym modello REV, che ha permesso con la sua tecnologia innovativa di eseguire un protocollo di allenamento con sovraccarico eccentrico

2.4 Analisi HDsEMG

2.4.1 Protocollo analisi HDsEMG

Ad ogni partecipante sono stati eseguiti dei test di valutazione dell'attività elettromiografica prima di iniziare il protocollo di allenamento e alla conclusione. I soggetti sono stati fatti accomodare in posizione seduta con le ginocchia a 60° di flessione sul piano sagittale. Dopodiché è stata fissata la caviglia dell'arto inferiore destro con delle cinghie a un dinamometro per ginocchia fatto su misura e dotato di una cella di carico (RS 206-0290). Successivamente, ogni partecipante è stato stabilizzato a livello della vita con un'ulteriore cinghia alla seduta, per evitare qualsiasi tipo di movimento accessorio durante le prove. Come primo procedimento si è valutata la contrazione isometrica volontaria massima (MVC) dei muscoli estensori del ginocchio dell'arto inferiore destro. Prima è stato fatto eseguire un riscaldamento composto da contrazioni isometriche volontarie submassimali, e poi i partecipanti, dopo le adeguate istruzioni, hanno eseguito la contrazione volontaria massima (MVC) esprimendo il massimo sforzo contraendo l'arto inferiore "il più forte possibile" contro la cella di carico e mantenendo la tensione per 3-4 secondi. La MVC è stata eseguita per 3 volte con 1 minuto di riposo tra una prova e l'altra, infine l'MVC è stata considerata come il valore massimo di tensione raggiunto nelle 3 prove. Dopo aver determinato l'MVC, i partecipanti hanno eseguito 2 contrazioni isometriche trapezoidali al 35% dell'MVC, della durata di 30s, e altre 2 contrazioni isometriche trapezoidali al 70% dell'MVC, sempre della durata di 30s, con angolo di ginocchio a 60°, formando una prova A e una prova B per tutte e due le intensità. Il tutto ad una velocità di sviluppo e diminuzione della coppia pari al 5% MVC/s. Ogni prova è stata separata da 1 minuto di riposo. Le prove registrate sono state denominate con "PRE" quelle conseguite prima del protocollo di allenamento, e "POST" quelle eseguite alla fine del protocollo di allenamento. Ai partecipanti, per eseguire correttamente il compito richiesto, gli è stato fornito uno schermo di fronte a loro dove veniva mostrata una sagoma trapezoidale con la forza da imprimere in base alla figura. Per ogni prova, è stato registrato il segnale di forza dalla cella di carico sincronizzato con il segnale HDsEMG a 2048 Hz utilizzando un amplificatore multicanale (Quattrocento, OTBioelettronica, Torino, Italia). Il segnale HDsEMG è stato raccolto dal muscolo VL destro utilizzando una griglia semidisponibile a

64 canali (13x5) con una distanza interelettroica di 8 mm (GR08MM1305, OTBioelettronica, Torino, Italia) e riempita con una pasta conduttiva (Ac cream, OTBioelettronica, Torino, Italia). Il procedimento pratico è stato basato prima sulla preparazione della pelle (consistente in rasatura), poi sul posizionamento della griglia sopra la zona di innervazione del muscolo e posta parallelamente all'orientamento del fascicolo muscolare. Per individuare il punto motore del muscolo vasto laterale (VL) destro con maggiore attività dei soggetti, è stata impressa una stimolazione elettrica percutanea a bassa intensità (8-16 mA) nell'area distale del muscolo. Invece per rilevare l'orientamento delle fibre muscolari è stata utilizzata l'ecografia (Mylab70; Torino, Italia).



Fig.3 Nella figura A è presentato il dinamometro isometrico ed il set up sperimentale. Nell'immagine B è raffigurata a matrice adesiva con 64 elettrodi, con una distanza interelettroica di 8 mm (13 righe - 5 colonne): nel pannello C un'immagine della cella di carico utilizzata per acquisire il segnale di forza; nel pannello C è presentato il Ouattrocento, amplificatore di segnali bioelettrici a 400 canali utilizzato per amplificare e registrare i segnali elettromiografici di superficie dal muscolo vasto laterale durante l'estensione di ginocchio isometrica.

2.4.2 Data processing HDsEMG

Dopo aver raccolto tutti i dati dei 16 partecipanti con l'elettromiografia di superficie ad alta densità (HDsEMG), il procedimento per ripulire i dati è stato composto da più fasi.

Come prima cosa i dati sono stati scaricati e decomposti utilizzando un filtraggio passa-banda (20-500 Hz, filtro Butterworth del secondo ordine), il segnale HDsEMG è stato scomposto in singoli potenziali d'azione MU utilizzando utilizzando la sorgente cieca convolutiva con il software demuse (Francic e Holobar, 2021) realizzato in Matlab (Mathworks, Inc., Natick). Questo processo, molto dispendioso da un punto di vista temporale, ma fondamentale per determinare l'accuratezza delle unità motorie studiate, ha consentito di analizzare i risultati della decomposizione ed eventualmente di correggerne errori ed eliminare i duplicati. Il procedimento di decomposizione delle unità motorie si è realizzato dapprima editando quelle trovate ad intensità 35% dell'MVC, e successivamente quelle al 70% dell'MVC. Una volta migliorato il profilo delle MU, per analizzare le proprietà delle unità motorie, si è usufruito del software Openhdemg (Valli et al. 2024).

Nello specifico i parametri ricercati con l'utilizzo del software Openhdemg (Valli et al. 2024) sono stati: la soglia di reclutamento, la soglia di dereclutamento, frequenza di scarica al reclutamento, frequenza di scarica al dereclutamento, frequenza di scarica steady state e la velocità di conduzione.

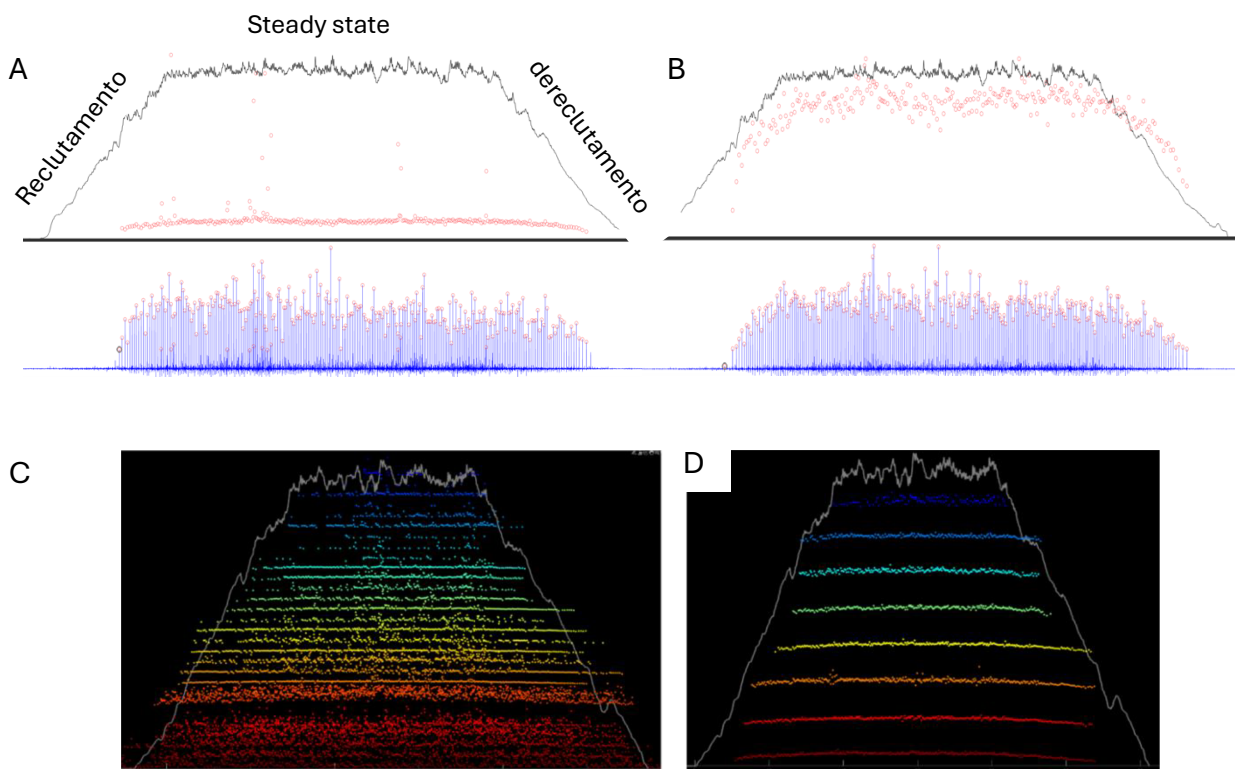


Fig.4 Nel pannello A in basso sono rappresentati alcuni spari di un'unità motoria non ancora ispezionati, ed è possibile osservare irregolarità nei singoli spari dell'unità motoria analizzata,

superiormente è rappresentata la curva di forza riguardante la rampa trapezoidale al 35% dell'MVC. Nel pannello B è raffigurata la stessa unità motoria mostrata in A, ma in seguito al processo di ispezione visuale e di correzione manuale grazie al software demuse (Francic e Holobar, 2021) realizzato in Matlab (Mathworks, Inc., Natick). Nel pannello C è rappresentato un file HDsEMG decomposto ma non ancora processato, in cui ogni colore rappresenta un 'unità motoria identificata dall'algoritmo. Nel pannello D si visualizzano le unità motorie in seguito al processing basato sull'ispezione visiva (con relativa correzione) di tutte le unità motorie inizialmente decomposte.

2.5 Analisi statistica

Tutti i test statistici sono stati eseguiti in R (versione 4.1.0) utilizzando l'ambiente RStudio (versione 1.4.1717). Le differenze in MVC sono state studiate utilizzando ANOVA unidirezionale e paired *t*-test. Le differenze nelle caratteristiche di attivazione di MU (tasso di scarica di picco, durata di attivazione, durata delle fasi ascendente e discendente) tra i punti di raccolta dati sono state valutate con linear mixed models utilizzando il pacchetto lmerTest. Ogni MU è stata trattata come misure ripetute, con le condizioni (PRE e POST) come fattore fisso e un'intercetta casuale per ogni partecipante. La media marginale stimata all'intervallo di confidenza del 95% è stata calcolata utilizzando il pacchetto emmeans. Il livello di significatività è stato impostato su $\alpha = 0,05$. Inoltre, le MU sono state suddivise in 3 fasce in base alla percentuale di reclutamento della forza espressa, ovvero tra (0%-25%), (25%-50%) e (50%-70%).

3. RISULTATI

L'analisi finale ha incluso un totale di 16 partecipanti, nello specifico sono stati trovate per i soggetti che hanno eseguito le rampe trapezoidali con angolo di 60° i seguenti risultati: 155 unità motorie totali, sommando sia quelle del gruppo convenzionale che quelle del gruppo con sovraccarico eccentrico nel PRE (prima dell'inizio del protocollo di allenamento di 6 settimane) al 35% dell'MVC; mentre sono state trovate 167 unità motorie totali sempre sommate da entrambi i 2 gruppi nel POST (successivamente alla conclusione delle 6 settimane di protocollo di allenamento) al 35% dell'MVC. Inoltre, sono state calcolate un totale di 82 unità motorie, sommando sia quelle del gruppo convenzionale che quelle del gruppo con sovraccarico eccentrico nel PRE (prima dell'inizio del protocollo di allenamento di 6 settimane) al 70% dell'MVC; mentre sono state trovate 102 unità

motorie totali sempre sommate da entrambi i 2 gruppi nel POST (successivamente alla conclusione delle 6 settimane di protocollo di allenamento) al 70% dell'MVC.

Nel complesso nel PRE e POST al 35% e la 70% dell'MVC sono state trovate 506 unità motorie nei 16 partecipanti.

3.1 MVC

Per quanto riguarda i risultati ottenuti misurando la massima contrazione volontaria (MVC) abbiamo trovato delle differenze fra i soggetti dello stesso gruppo nel PRE e POST protocollo di allenamento, nello specifico negli 8 soggetti facenti parte del gruppo di allenamento convenzionale CONV l'MVC misurato nel POST è aumentato significativamente rispetto alla misurazione ottenuta nel PRE (690,23N e 631,84N rispettivamente; $P= 0.009319$, Fig.3.1.1). Mentre, per gli 8 soggetti che hanno eseguito il protocollo di allenamento con sovraccarico eccentrico ECC l'MVC misurato è nel POST è aumentato non significativamente rispetto alla misurazione ottenuta nel PRE (682,74N e 650, 53N rispettivamente, $P= 0.05153$, Fig.3.1.1)

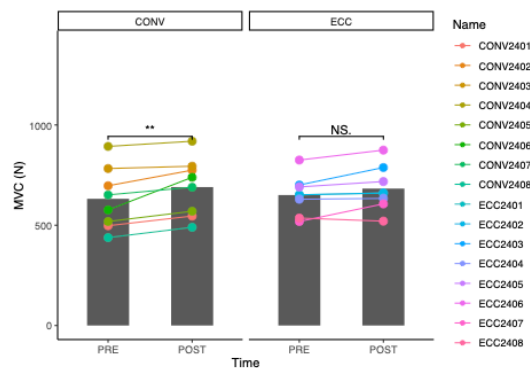


Fig.3.1.1 In figura sono rappresentati i cambiamenti della massima contrazione volontaria MVC tra PRE e POST per ogni soggetto del gruppo CONV e del gruppo ECC

3.2 Proprietà delle unità motorie

Il primo parametro analizzato è la soglia di reclutamento delle MU (Rel Rec %), che consiste nel valore percentuale della forza alla quale l'unità motoria inizia la sua attività. Dall'analisi statistica tutti i valori ottenuti risultano non significativi ($p>0.05$), rispettivamente per l'intensità al 35% e al

70% dell'MVC, per le unità motorie a bassa soglia (fascia 0%-25%), media soglia (25%-50%) e alta soglia (50%-70%) (Fig. 3.2.1)

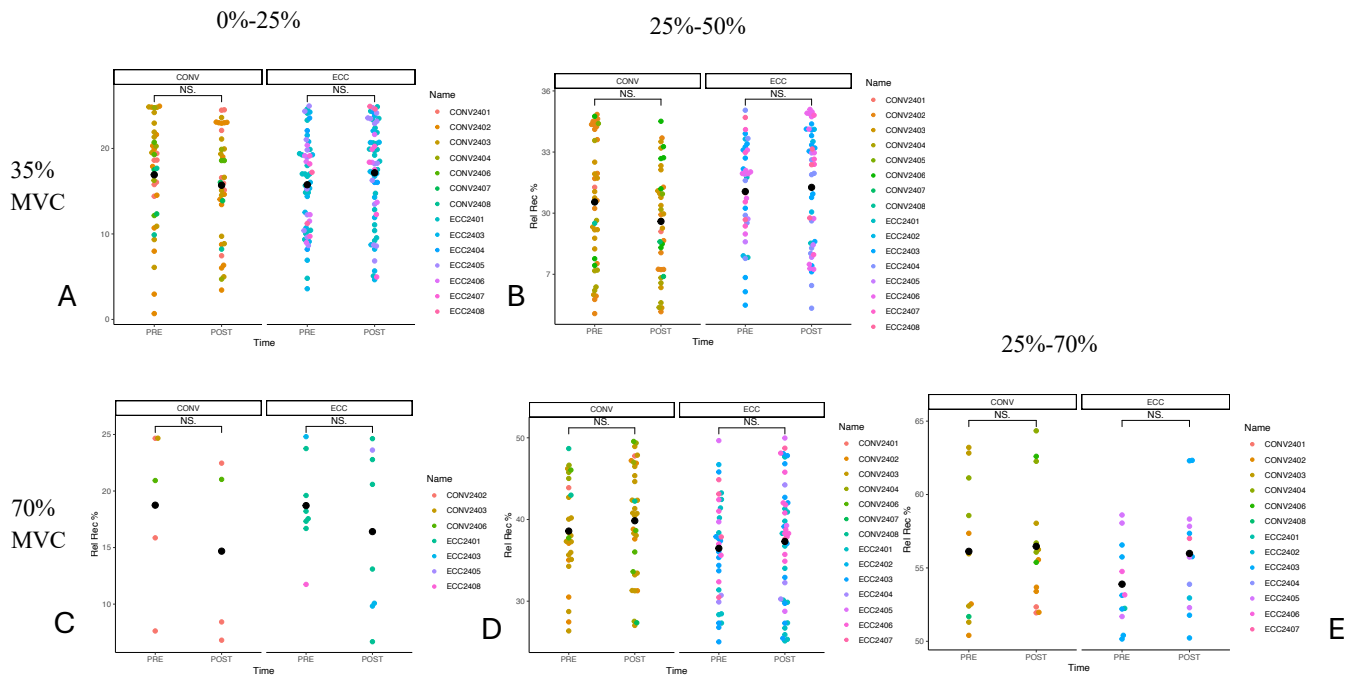


Fig. 3.2.1 In figura sono rappresentati i grafici del parametro della soglia di reclutamento (Rel Rec %) con valori non significativi ($p > 0.05$) per i gruppi CONV ed ECC rispettivamente tra il PRE e POST per le unità motorie a bassa soglia (0%-25%), media soglia (25%-50%) e alta soglia (50%-70%), figure (A), (B), (C), (D), (E)

Il secondo parametro che abbiamo analizzato è la soglia di dereclutamento, Per il parametro della soglia di dereclutamento delle MU (Rel DeRec %), ossia il valore percentuale della forza alla quale l'unità motoria conclude la sua attività, i risultati significativi che osserviamo al 35% dell'MVC nella fascia tra (0%-25%), sono aumentati dal PRE (emmean=12.3, SE=1.43, $P=0.0052$, Fig.3.2.2) al POST (emmean=15.3, SE=1.42, $P=0.0052$, Fig.3.2.2) del gruppo con sovraccarico eccentrico ECC; mentre per il gruppo convenzionale CONV i valori sono aumentati anch'essi ma non sono significativi nel POST (emmean=11.3, SE=1.57, $P=0.6867$, Fig.3.2.2) rispetto al PRE (emmean=11.8, SE=1.54, $P=0.6867$, Fig.3.2.2). Inoltre, abbiamo riscontrato nello stesso parametro, ma al 35% nella fascia tra (25%-50%), una leggera diminuzione significativa nel gruppo ECC nel POST (emmean=27.9, SE=1.19, $P=0.0503$, Fig.3.2.2) rispetto al PRE (emmean=25.8, SE=1.22, $P=0.0503$, Fig.3.2.2), mentre nel gruppo CONV anche in questo caso i valori sono diminuiti dal PRE

(emmean=25.2, SE=1.33, $P=0.3464$, Fig.3.2.2) al POST (emmean=24.1, SE=1.31, $P=0.3464$, Fig.3.2.2) ma non sono significativi. I valori di tutti gli altri grafici sono non significativi ($p>0.05$).

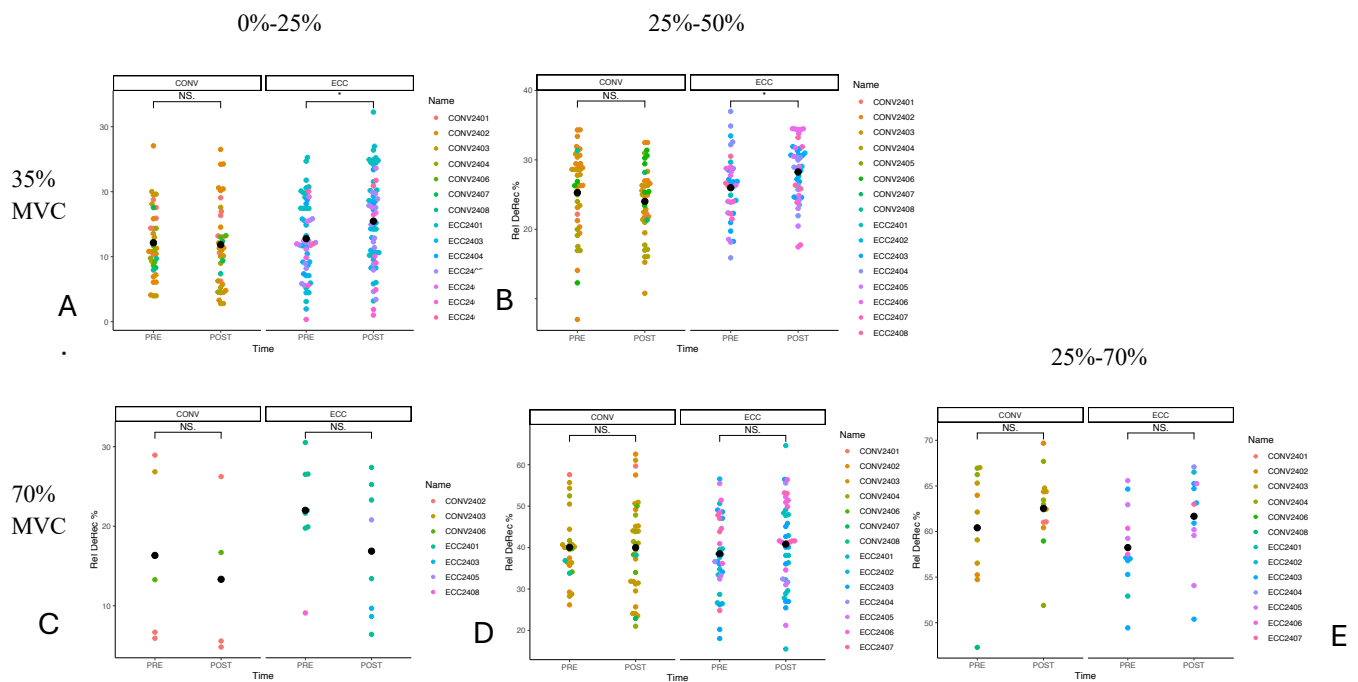


Fig. 3.2.2 Nei grafici sono rappresentati i cambiamenti significativi nel parametro della soglia di dereclutamento (Rel DeRec %) tra PRE e POST per i gruppi CONV ed ECC rispettivamente nella rampa al 35% dell'MVC per le unità motorie a bassa soglia (0%-25%) (A) e per le unità motorie a media soglia (25%-50%) (B), mentre per il grafico (C), (D) ed (E) i valori sono non significativi ($p>0.05$).

Abbiamo poi ottenuto come terzo parametro valori per la frequenza di scarica al reclutamento (DR_rec_pps), ovvero il valore medio di scarica dei motoneuroni al reclutamento, che corrisponde alla fase ascendente della rampa. I risultati significativi che abbiamo potuto osservare al 70% dell'MVC nella fascia (25%-50%) per il gruppo CONV, sono diminuiti nel POST (emmean=7.98, SE=0.787, $P=0.0021$, Fig.3.2.3) rispetto al PRE (emmean=9.73, SE=0.812, $P=0.0021$, Fig.3.2.3); invece i valori trovati nel gruppo ECC risultano non significativi con aumento nel POST (emmean=9.98, SE=0.752, $P=0.8202$, Fig.3.2.3) dal PRE (emmean=10.9, SE=0.756, $P=0.8202$, Fig.3.2.3). I valori di tutti gli altri grafici sono non significativi ($p>0.05$).

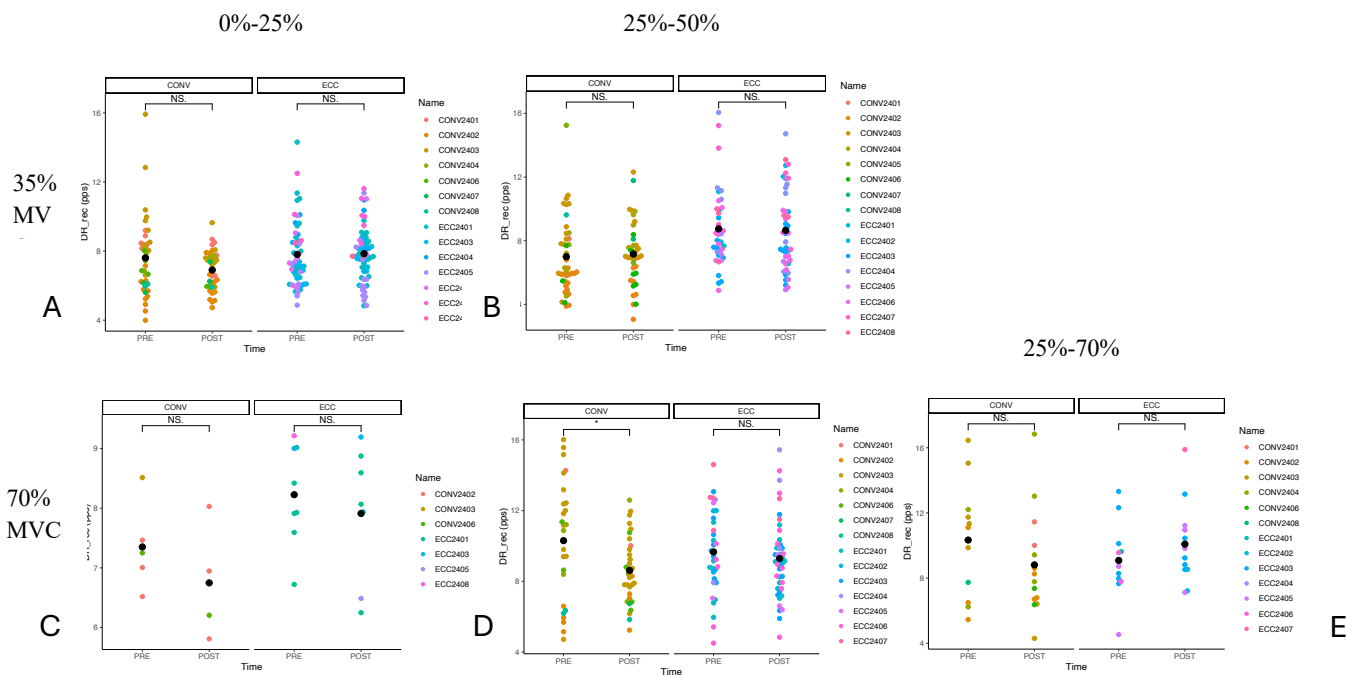


Fig. 3.2.3 In figura è rappresentata la variazione dei risultati significativi del parametro della frequenza di scarica al reclutamento (DR_{rec_pps}) tra PRE e POST di entrambi i gruppi CONV ed ECC al 70% dell'MVC per unità motorie a media soglia (25%-50) (D), mentre per il grafico (A), (B), (C) ed (E) i valori sono non significativi ($p > 0.05$).

Successivamente, come quarto parametro, abbiamo identificato la frequenza di scarica di dereclutamento (DR_{derec_pps}), che riguarda il valore medio di scarica dei motoneuroni al dereclutamento, corrispondente alla fase discendente della rampa. Abbiamo constatato che, al 35% dell'MVC nella fascia (25%-50%), è incrementata significativamente nei soggetti ECC POST (emmean=7.22, SE=0.485, $P=0.0145$, Fig.3.2.4) in confronto al PRE (emmean=6.50, SE=0.490, $P=0.0145$, Fig.3.2.4); inoltre abbiamo potuto osservare che per il gruppo CONV i risultati non sono significativi, ed hanno avuto un leggero aumento nel POST (emmean=6.16, SE=0.519, $P=0.0838$, Fig.3.2.4) dal ECC (emmean=6.70, SE=0.523, $P=0.0838$, Fig.3.2.4). I valori di tutti gli altri grafici sono non significativi ($p > 0.05$).

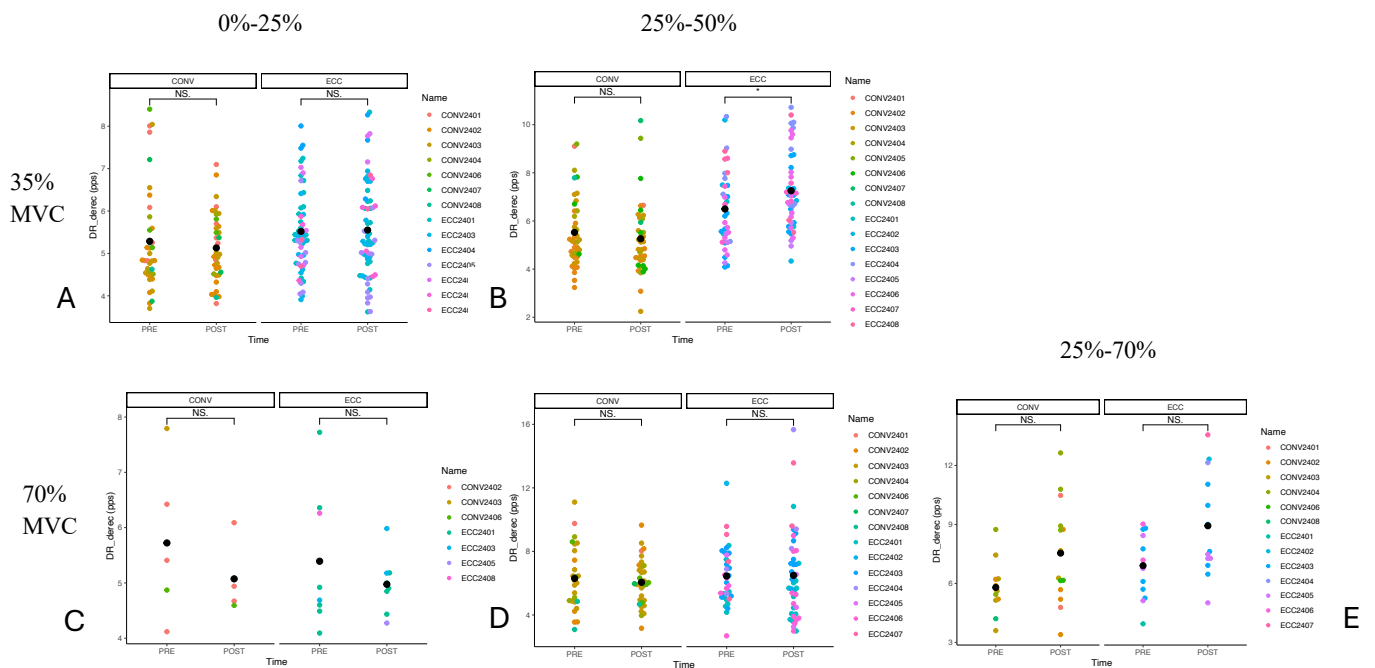


Fig.3.2.4 Nel grafico è rappresentato il cambiamento significativo nel parametro della frequenza di scarica di dereclutamento (DR_derec_pps) tra PRE e POST per i gruppi CONV ed ECC al 35% dell'MVC per le unità motorie a media soglia (25%-50%) (B), mentre per il grafico (A), (C), (D) ed (E) i valori sono non significativi ($p > 0.05$).

Abbiamo poi ottenuto come quinto parametro la frequenza di scarica allo steady state ($DR_all_steady_pps$), che corrisponde al valore medio di scarica dei motoneuroni nella fase di mantenimento della forza, ossia nella fase di steady state della rampa. I risultati che abbiamo osservato sono significativi al 70% dell' MVC nella fascia (25%-50%) per tutti e due i gruppi, nello specifico i valori del gruppo CONV risultano diminuiti ma con un andamento più omogeneo tra il PRE (emmean=15,9, SE=1.06, $P=0.0001$, Fig3.2.5) e il POST (emmean=14.1, SE=1.04, $P=0.0001$, Fig.3.2.5); invece per il gruppo ECC leggermente aumentati e meglio distribuiti dal PRE (emmean=18.6, SE=1.03, $P=0.0513$, Fig.3.2.5) al POST (emmean=17.8, SE=1.03, $P=0.0513$, Fig.3.2.5). I valori di tutti gli altri grafici sono non significativi ($p > 0.05$).

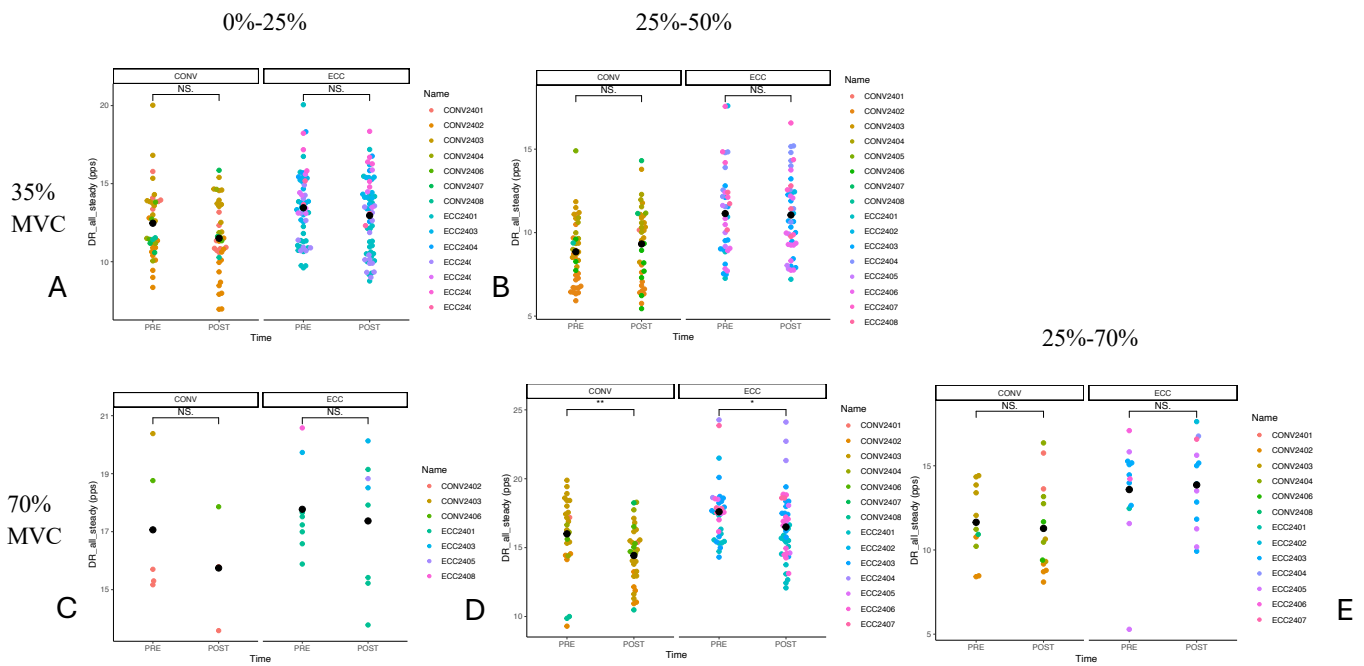


Fig.3.2.5 In figura si può osservare la variazione dei valori significativi tra PRE e POST per il parametro della frequenza di scarica allo steady state ($DR_{all_steady_pps}$) per entrambi i gruppi CONV ed ECC, per la rampa al 70% per le unità motorie a media soglia (25%-50%) (D), mentre per il grafico (A), (B), (C) ed (E) i valori sono non significativi ($p > 0.05$).

Come ultimo parametro abbiamo ottenuto dei risultati nella velocità di conduzione (CV_m/s), ossia la velocità di propagazione dei potenziali d'azione lungo le fibre muscolari innervate dai singoli motoneuroni, dove abbiamo riscontrato dei valori significativi al 35% dell'MVC nella fascia (0%-25%) nel gruppo ECC, ed in questo caso i risultati sono di poco diminuiti ma meglio distribuiti nel POST (emmean=4.69, SE=0.0646, $P=0.0316$, Fig.3.2.6) rispetto il PRE (emmean=4.55, SE=0.0658, $P=0.0316$, Fig.3.2.6); mentre nel gruppo CONV i valori sono non significativi e sono molto simili tra PRE (emmean=4.61, SE=0.0743, $P=0.3723$, Fig.3.2.6) e POST (emmean=4.68, SE=0.756, $P=0.3723$, Fig.3.2.6). I valori di tutti gli altri grafici sono non significativi ($p > 0.05$).

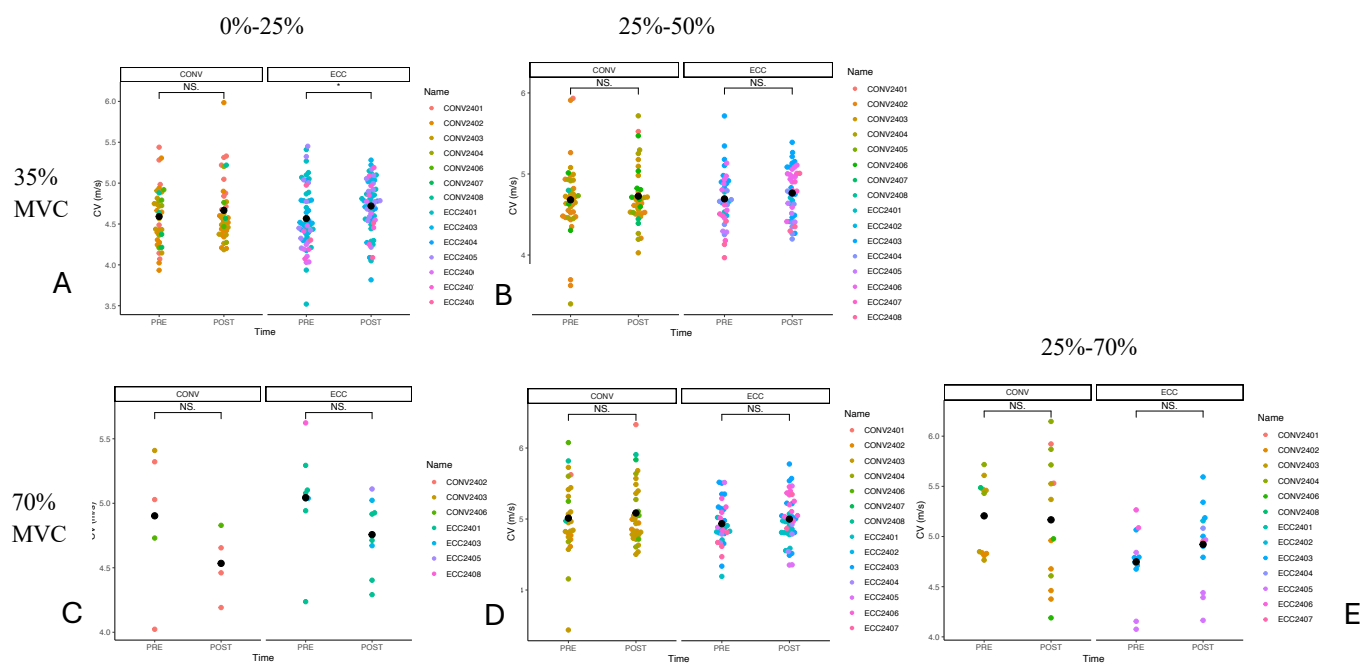


Fig.3.2.6 In figura si può osservare la variazione dei valori tra PRE e POST per il parametro della frequenza di scarica a inizio steady state ($CV_{m/s}$) per entrambi i gruppi CONV ed ECC, per la rampa al 35% dell'MVC per le unità motorie a bassa soglia (0%-25%) (A), mentre per il grafico (B), (C), (D) ed (E) i valori sono non significativi ($p > 0.05$).

4. DISCUSSIONE

4.1 Discussione dei risultati

Lo scopo principale di questa tesi era quello di indagare gli adattamenti neurali e la variazione delle proprietà delle unità motorie in seguito a due protocolli di allenamento differenti, uno convenzionale CONV e uno con sovraccarico eccentrico ECC, della durata di 6 settimane, eseguiti da 16 soggetti totali. Da quanto disponibile in letteratura, ci si sarebbe aspettato di osservare cambiamenti più evidenti proprio sul sistema neurale, essendo che, temporalmente, il muscolo risponde allo stimolo dell'allenamento aumentando la sua capacità di esprimere forza, dapprima mediante cambiamenti a livello del sistema nervoso (osservabili a livello di unità motoria) e soltanto in seguito con cambiamenti di natura morfologica. Inoltre, data la scarsità di studi recenti che hanno analizzato i cambiamenti neurali basati su programmi di allenamento della durata superiore alle 4 settimane, e nello specifico utilizzando un sovraccarico eccentrico ECC, questo studio ha voluto analizzare gli adattamenti delle attività e proprietà delle singole unità motorie, in seguito a 6 settimane di allenamento con protocollo di allenamento convenzionale CONV e con sovraccarico eccentrico ECC. In questa tesi l'obiettivo fondamentale è stato quello di osservare se, grazie all'utilizzo di un carico maggiore nella fase di contrazione eccentrica rispetto alla concentrica, ci sarebbero stati degli adattamenti del sistema nervoso importanti, tali da sfruttare il potenziale della forza espressa con la contrazione in allungamento, che si è visto essere superiore alla concentrica (Tiril Tøien & Håvard Pedersen Haglo et al., 2018; Martino et al., 2024). Tutto questo è stato possibile grazie all'utilizzo di una tecnica innovativa e non invasiva, ossia l'HDsEMG, che ha permesso di analizzare con precisione i cambiamenti delle proprietà delle unità motorie, trovate a due differenti intensità, 35% e 70% dell'MVC.

Basandoci sui risultati ottenuti da questo studio abbiamo potuto osservare dei cambiamenti nei parametri ricercati delle proprietà delle unità motorie, osservando le differenze tra PRE e POST sia nel gruppo CONV sia in quello ECC.

4.1.1 Cambiamenti dell'MVC

Partendo dall'MVC, ovvero la forza massima esprimibile volontariamente dai muscoli estensori del ginocchio, è aumentata in modo significativo per il gruppo convenzionale CONV rispetto alla misurazione ottenuta nel PRE di 58,39N ($P= 0.009319$, Fig.3.1.1). Mentre, l'MVC del gruppo con sovraccarico eccentrico ECC, l'MVC nel POST è aumentato, ma non significativamente in confronto

al PRE di 32,21N ($P= 0.05153$, Fig.3.1.1). Questi dati sono in linea con ciò che ci aspettavamo, ovvero un aumento della forza massima volontaria in entrambi i gruppi. In generale l'aumento dell'MVC è stato già stato riscontrato in altri studi presenti in letteratura, che hanno similmente studiato gli adattamenti dei muscoli estensori di ginocchio in seguito ad allenamento contro-resistenza (Kamen e Knight; 2004), ma anche in studi che hanno utilizzato il sovraccarico eccentrico ECC (Balshaw et al., 2016). Abbiamo osservato che i soggetti del gruppo CONV hanno aumentato l'MVC in maniera maggiore in confronto ai soggetti del gruppo ECC, anche se i risultati di quest'ultimi non sono significativi. Questo ci porta a pensare che il gruppo CONV abbia avuto degli adattamenti positivi al sistema neurale che lo ha reso più efficace e in grado di esprimere la forza durante uno sforzo massimale.

4.1.2 Variazioni nella soglia di reclutamento e di dereclutamento

Per quanto riguarda la soglia di reclutamento/dereclutamento, corrispondente al valore di forza percentuale di MVC a cui l'unità motoria viene volontariamente attivata/deattivata durante la contrazione, abbiamo osservato dei cambiamenti nei due gruppi tra PRE e POST. Per quanto riguarda la soglia di reclutamento tutti i valori ottenuti risultano non significativamente differenti ($p>0.05$), rispettivamente per l'intensità al 35% e al 70% dell'MVC, quindi per le unità motorie a bassa soglia (fascia 0%-25%), media soglia (25%-50%) e alta soglia (50%-70%) (Fig. 3.2.1). Osservando i grafici però (Fig.3.2.1) possiamo notare che per entrambi i gruppi CONV e ECC, i valori della soglia di reclutamento sono rimasti pressoché invariati, pertanto, le strategie di reclutamento dei soggetti rimangono mantenute in seguito alle 6 settimane di allenamento contro-resistenza sia con protocollo di allenamento convenzionale CONV sia con quello con sovraccarico eccentrico ECC. In letteratura, si trovano due studi simili alle modalità del nostro, quello di Del Vecchio (2019) e quello di Casolo (2020), che hanno riportato una diminuzione della soglia di reclutamento; quindi, interpretabile come miglioramento nella risposta delle unità motorie che vengono attivate prima, a stimoli minori, rispetto a prima dell'allenamento. Però il loro studio è stato eseguito nel muscolo tibiale anteriore; perciò, non è possibile fare un confronto diretto con i risultati di questi studi, in quanto questa ricerca si è basata sullo studio del muscolo vasto laterale (VL).

Per quanto riguarda la soglia di dereclutamento, i risultati ottenuti sono aumentati in modo significativo al 35% dell'MVC nella fascia tra (0%-25%), unità motorie a bassa soglia, nel gruppo con sovraccarico eccentrico ECC (Fig.3.2.2). Invece sempre al 35% però nella fascia tra (25%-50%), unità motorie a media soglia, una leggera diminuzione significativa nel gruppo con sovraccarico

eccentrico ECC (Fig.3.2.2). Per quanto riguarda l'aumento delle prime unità motorie a bassa soglia (0%-25%), sembrerebbe implicare un cambiamento delle strategie di dereclutamento indotto dall'allenamento, poichè le unità motorie sembrerebbero deattivarsi a percentuali di forza maggiori nel POST rispetto al PRE. Questa interpretazione dei risultati potrebbe suggerire un potenziale miglioramento dell'efficienza del sistema nervoso nella fase discendente di controllo della forza, grazie al maggior utilizzo di unità motorie a soglia più alta che permetterebbero di produrre più forza.

4.2.3 *Variazioni nella frequenza di scarica al reclutamento e al dereclutamento*

Per il parametro della frequenza di scarica al reclutamento e al dereclutamento, ovvero il valore medio di scarica dei motoneuroni al reclutamento e al dereclutamento, che corrisponde alla fase ascendente/discendente della rampa, abbiamo osservato pochi risultati significativi. Nello specifico, per la frequenza di scarica al reclutamento i valori statisticamente significativi li abbiamo ottenuti solo nel gruppo CONV al 70% dell'MVC, quindi a livelli di forza maggiore, per le unità motorie a media soglia (25%-50%) (Fig.3.2.3), dove sembrerebbe essere avvenuta una diminuzione della frequenza di scarica, interpretabile come un potenziale miglioramento nella frequenza degli impulsi inviati alle unità motorie a media soglia, grazie all'ottimizzazione del sistema neurale che invierebbe meno impulsi ma in modo più efficiente, così da produrre più forza utilizzando meno input neurale. Per quanto riguarda il parametro della frequenza di scarica al dereclutamento, osserviamo dei risultati statisticamente significativi solo nel gruppo ECC al 35% dell'MVC, quindi a livelli di forza minori, per le unità motorie a media soglia (25%-50%)(Fig.3.2.4), dove sembrerebbe esserci stato un'aumento della frequenza di scarica al dereclutamento, e questo significa che il sistema neurale utilizzerebbe meno unità motorie nella fase di discesa della rampa trapezoidale, ma che allo stesso tempo sfrutterebbe di più le unità motorie a media soglia verso la fine. Questo risultato ci conferma l'aumento ottenuto anche nella soglia di dereclutamento e lo interpretiamo come un incremento nell'efficienza del sistema nervoso nel gestire il rilascio di forze muscolari. Nello studio di Del Vecchio et al., (2019), a differenza dei nostri risultati, non è avvenuto nessun cambiamento della frequenza di scarica sia nella fase di reclutamento che di dereclutamento. Mentre in quello di Vila-Cha et. Al., (2010), si osserva un aumento significativo della frequenza di scarica.

4.2.4 *Variazione della frequenza di scarica allo steady state*

Per quanto riguarda il parametro della frequenza di scarica allo *steady state*, che corrisponde al valore medio di scarica dei motoneuroni nella fase di mantenimento della forza, ossia nella fase *di steady state* della rampa, i risultati che abbiamo osservato sono significativi al 70% dell'MVC per le unità

motorie a media soglia, fascia (25%-50%) (Fig.3.2.5), per tutti e due i gruppi CONV ed ECC. In questo caso c'è stato un'aumento della frequenza di scarica allo *steady state*, il che ci porta a interpretare questi risultati come un'incremento della capacità delle unità a media soglia di attivarsi a frequenze leggermente più alte e quindi a produrre più forza. Questo ci porta a constatare un miglioramento dell'input neurale nella fase in cui è richiesto il mantenimento di un certo livello di forza per un periodo prolungato (*steady state*), e sembrerebbe essere in accordo con quanto osservato nello studio Del Vecchio et al., (2019).

4.2.5 Cambiamento nella velocità di conduzione

Nel parametro della velocità di conduzione (CV_m/s), ossia la velocità di propagazione dei potenziali d'azione lungo le fibre muscolari innervate dai singoli motoneuroni, abbiamo riscontrato valori significativi solo nel gruppo ECC al 35% dell'MVC nelle unità motorie a bassa soglia, fascia (0%-25%) (Fig.3.2.6). Contrariamente a quanto ci aspettavamo, dai risultati si può notare una leggera diminuzione della velocità di conduzione del segnale elettrico nel POST, il che ci porta a credere che ci sia un peggioramento e rallentamento nella conduzione dei potenziali d'azione alle fibre muscolari, e che quindi il muscolo si attiverà più tardi. All'opposto invece, nello studio di Hayman O et al., (2024), si osservano un'aumento della velocità di conduzione, e quindi un sistema nervoso più efficace ad inviare gli input neurali al muscolo per mantenere costante lo sforzo.

In generale, dall'analisi statistica non abbiamo ottenuto molta significatività nei risultati ($p > 0.05$), ma da quelli significativi è stato possibile realizzare un'adeguata analisi dei valori nei due gruppi CONV ed ECC tra il PRE e POST. Dalle nostre ipotesi iniziali la soglia di reclutamento e la velocità di conduzione del segnale si sono dimostrate l'opposto, in quanto ci aspettavamo un miglioramento. Al contrario, siamo stati soddisfatti dei risultati ottenuti sull'aumento dell'MVC, sulla soglia di dereclutamento, sulla frequenza di scarica al reclutamento e dereclutamento e sulla frequenza di scarica allo *steady state*. Inoltre, abbiamo osservato un sistema neurale maggiormente efficace nell'utilizzare le unità motorie a media ed alta soglia (25%-50%), (50%-70%) per la produzione di livelli di forza maggiori e prolungati nel tempo, sia nel gruppo CONV che nel gruppo ECC. Quindi, questi risultati sono in accordo con lo studio di Balshaw et al., (2016), dove presume che l'incremento della forza sia possibile anche grazie alle unità motorie a media ed alta soglia, che in base all'ordine gerarchico vengono reclutate più tardi (Henneman, 1957), ma che possano in questo caso essere attivate prima durante il sovraccarico eccentrico ECC per stimolare tale adattamento.

4.2 Limitazioni

Nonostante i diversi punti di forza che hanno contribuito a prendere maggior consapevolezza degli adattamenti delle unità motorie dopo allenamento di resistenza con e senza sovraccarico eccentrico, il presente studio presenta anche alcuni punti di debolezza o limitazioni. Una di queste limitazioni è che non è stata fatta una differenziazione per genere tra maschi e femmine delle unità motorie in entrambi i gruppi nell'analisi statistica. Un altro punto di debolezza riguarda la somministrazione del Global Physical Activity Questionnaire (GPAQ), il questionario per la quantificazione degli abituali livelli di attività fisica, prima di iniziare con i protocolli di allenamento, ma che successivamente non è stato più preso in considerazione alla conclusione dello studio, per verificare se ci fossero stati dei cambiamenti nelle abitudini quotidiane dell'attività fisica. Collegato alla precedente limitazione, i partecipanti hanno accettato di astenersi nel praticare esercizio fisico estenuante e, nello specifico, di non allenare gli arti inferiori durante tutto il periodo dello studio per non inficiare i risultati finali, ma a questo proposito non ne abbiamo la certezza. Un'ulteriore limitazione è il numero di unità motorie identificate e quelle ritenute definitivamente utili per l'analisi statistica. Come ultima limitazione constatata, riguarda l'analisi statistica che si è rivelata debole, in quanto la maggior parte dei risultati statistici ottenuti sono non significativi ($p > 0.05$), probabilmente conseguenza di un numero di soggetti e/o unità motorie identificate troppo basso. Quindi, questi dati si possono considerare preliminari, e a questo proposito aumenteremo il campione di soggetti nel proseguimento dello studio.

5. CONCLUSIONE

Il nostro studio ha dimostrato che 6 settimane di allenamento contro resistenza con e senza sovraccarico eccentrico in giovani sani sono in grado di indurre degli adattamenti a livello neuromuscolare. In particolare, sono stati riscontrati cambiamenti nell'MVC, soglia al reclutamento/dereclutamento, frequenza di scarica di reclutamento/dereclutamento, frequenza di scarica allo *steady state* e nella velocità di conduzione del segnale, analizzate tramite HDsEMG del muscolo vasto laterale. Nonostante la scarsità di risultati statisticamente significativi in confronto alle aspettative, a confermare la nostra ipotesi iniziale di un aumento di forza in seguito ad allenamento con sovraccarico eccentrico ECC, sono l'incremento dell'MVC, della soglia al dereclutamento, della frequenza di scarica al dereclutamento e della frequenza di scarica allo *steady state*. I risultati ottenuti dunque dimostrano l'importanza degli adattamenti neurali nell'espressione di forza in soggetti giovani in seguito ad un protocollo di allenamento con sovraccarico eccentrico ECC, anche se sono

necessari ulteriori studi al riguardo. Nel concreto questi adattamenti possono essere utili per diverse tipologie di soggetti nella popolazione, ad esempio ad atleti, per aumentare la performance sportiva, o a soggetti dopo infortunio, per ottimizzare i tempi di recupero, ma soprattutto anche per gli anziani, per combattere la sarcopenia e declino della forza massima.

BIBLIOGRAFIA

- Balshaw TG, Pahar M, Chesham R, Macgregor LJ, Hunter AM. *Reduced firing rates of high threshold motor units in response to eccentric overload*. *Physiol Rep*. 2017.
- Casolo A, Del Vecchio A, Balshaw TG, Maeo S, Lanza MB, Felici F, Folland JP, Farina D. *Behavior of motor units during submaximal isometric contractions in chronically strength-trained individuals*. *J Appl Physiol (1985)*. 2021.
- Casolo A, Farina D, Falla D, Bazzucchi I, Felici F, Del Vecchio A. *Strength Training Increases Conduction Velocity of High-Threshold Motor Units*. *Med Sci Sports Exerc*. 2020.
- Del Vecchio A, Negro F, Holobar A, Casolo A, Folland JP, Felici F, Farina D. *You are as fast as your motor neurons: speed of recruitment and maximal discharge of motor neurons determine the maximal rate of force development in humans*. *J Physiol*. 2019.
- Duchateau J, Enoka RM. *Neural control of lengthening contractions*. *J Exp Biol*. 2016.
- Folland JP, Williams AG. *The adaptations to strength training: morphological and neurological contributions to increased strength*. *Sports Med*. 2007.
- Franchi MV, Atherton PJ, Reeves ND, Flück M, Williams J, Mitchell WK, Selby A, Beltran Valls RM, Narici MV. *Architectural, functional and molecular responses to concentric and eccentric loading in human skeletal muscle*. *Acta Physiol (Oxf)*. 2014.
- Franchi MV, Reeves ND, Narici MV. *Skeletal Muscle Remodeling in Response to Eccentric vs. Concentric Loading: Morphological, Molecular, and Metabolic Adaptations*. *Front Physiol*. 2017.
- Gazzoni M, Farina D, Merletti R. *A new method for the extraction and classification of single motor unit action potentials from surface EMG signals*. *J Neurosci Methods*. 2004.
- Hayman O, Ansdell P, Angius L, Thomas K, Horsbrough L, Howatson G, Kidgell DJ, Škarabot J, Goodall S. *Changes in motor unit behaviour across repeated bouts of eccentric exercise*. *Exp Physiol*. 2024.
- HENNEMAN E. *Relation between size of neurons and their susceptibility to discharge*. *Science*. 1957.

Hirono T, Kunugi S, Yoshimura A, Holobar A, Watanabe K. *Acute changes in motor unit discharge property after concentric versus eccentric contraction exercise in knee extensor*. J Electromyogr Kinesiol. 2022.

Holobar, A., & Zazula, D. *Multichannel blind source separation using convolution Kernel compensation*. IEEE Transactions on Signal Processing. 2007

Kamen G, Knight CA. *Training-related adaptations in motor unit discharge rate in young and older adults*. J Gerontol A Biol Sci Med Sci. 2004.

Martino G, Valli G, Sarto F, Franchi MV, Narici MV, DE Vito G. *Neuromodulatory Contribution to Muscle Force Production after Short-Term Unloading and Active Recovery*. Med Sci Sports Exerc. 2024.

Moritani T, deVries HA. *Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain*. Am J Phys Med. 1979.

Narici MV, Roi GS, Landoni L, Minetti AE, Cerretelli P. *Changes in force, cross-sectional area and neural activation during strength training and detraining of the human quadriceps*. Eur J Appl Physiol Occup Physiol. 1989.

Škarabot J, Brownstein CG, Casolo A, Del Vecchio A, Ansdell P. *The knowns and unknowns of neural adaptations to resistance training*. Eur J Appl Physiol. 2021.

Tøien T, Pedersen Haglo H, Unhjem R, Hoff J, Wang E. *Maximal strength training: the impact of eccentric overload*. J Neurophysiol. 2018.

Van Cutsem M, Duchateau J, Hainaut K. *Changes in single motor unit behaviour contribute to the increase in contraction speed after dynamic training in humans*. J Physiol. 1998.

V. Glaser, A. Holobar and D. Zazula, "Real-Time Motor Unit Identification From High-Density Surface EMG," in IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol. 21, 2013.

Vila-Chã C, Falla D, Farina D. *Motor unit behavior during submaximal contractions following six weeks of either endurance or strength training*. J Appl Physiol (1985). 2010.

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare innanzitutto il professor Martino Franchi, mio relatore di tesi, per avermi trasmesso la passione e la curiosità verso il mondo della ricerca. Ringrazio inoltre Giovanni Martino, mio correlatore, per il suo aiuto e supporto durante tutte le fasi dello studio, soprattutto nella realizzazione dei risultati.

Un ringraziamento speciale anche agli altri tesisti di questo studio, per la collaborazione e il sostegno reciproco.

Infine ringrazio di cuore tutti coloro che mi hanno supportato e accompagnato in questo percorso giorno dopo giorno, iniziando dalla mia famiglia, che mi ha permesso di continuare gli studi e fare quello che più mi piaceva; un grazie a Lorenzo, il mio ragazzo, che mi ha aiutato anche nei momenti più difficili e ha gioito nei momenti più belli; un grazie alla sua famiglia, per l'interesse e il sostegno dimostrato in questi anni; un grazie ai miei nonni, specialmente alla nonna Gina che mi segue sempre dall'alto; un grazie ai miei amici più stretti e agli amici dell'università, per la vicinanza e l'incoraggiamento.

Per ultimo ma non per importanza, un ringraziamento a me stessa, per aver scelto questa strada e aver affrontato questo percorso con passione e determinazione passo dopo passo.