

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Scienze Biomediche

Corso di Laurea Triennale in Scienze Motorie

Tesi di Laurea

**ADATTAMENTI NEUROMUSCOLARI A 8 SETTIMANE DI ALLENAMENTO
CONTRO-RESISTENZA NEGLI ANZIANI**

Relatore: Dott. Casolo Andrea

Correlatore: Sampieri Alessandro

Laureando: Santinello Carlo

N° di matricola: 2050092

Anno Accademico 2023/2024

A mio nonno Valerio, che porto con me in ogni passo della vita

Sommario

1. INTRODUZIONE	4
1.1 DEFINIZIONE E FUNZIONAMENTO DELLE UNITÀ MOTORIE	4
1.2 EFFETTI DELL'INVECCHIAMENTO SULLA PERFORMANCE NEUROMUSCOLARE E ALLENAMENTO CONTRO RESISTENZA	5
1.3 SCOPO DELLO STUDIO	9
2. MATERIALI E METODI	10
2.1 RECLUTAMENTO DEI PARTECIPANTI	10
2.2 PANORAMICA DELLO STUDIO	10
2.3 TEST DI VALUTAZIONE NEUROMUSCOLARE	11
2.3.1 Configurazione del dinamometro e protocollo sperimentale.....	11
2.3.2 Massima Contrazione Volontaria isometrica (MVC).....	12
2.3.3 Contrazioni trapezoidali sub-massimali isometriche	12
2.4 ACQUISIZIONE E ANALISI DEI SEGNALI DI FORZA E HDsEMG.....	12
2.4.1 Segnale di forza.....	12
2.4.2 Segnale HDsEMG	13
2.5 PROTOCOLLO DI ALLENAMENTO CONTRO RESISTENZA	14
2.6 ANALISI STATISTICA	15
3. RISULTATI	16
3.1 MVC	16
3.2 UNITÀ MOTORIE	16
3.3 FREQUENZA DI SCARICA	17
3.4 SOGLIE DI RECLUTAMENTO E DERECLUTAMENTO	20
4. DISCUSSIONE	21
4.1 CAMBIAMENTI DELL'MVC	21
4.2 VARIAZIONI NELLA FREQUENZA DI SCARICA	22
4.3 VARIAZIONI NELLA SOGLIA DI RECLUTAMENTO/DERECLUTAMENTO	22
4.4 PUNTI DI FORZA DEL NOSTRO STUDIO	23
4.5 LIMITI DEL NOSTRO STUDIO.....	24

4.6. *CONCLUSIONE*24

BIBLIOGRAFIA.....25

ABSTRACT

Scopo dello studio: Esaminare gli adattamenti neurali implicati nella produzione di forza muscolare in seguito a un programma di allenamento contro resistenza di 8 settimane, con particolare riferimento alla frequenza di scarica e alle soglie di reclutamento e dereclutamento delle unità motorie.

Metodi: 7 partecipanti anziani (>65 anni) sono stati reclutati e hanno condotto un allenamento contro resistenza progressivo e dinamico. Essi sono stati testati 3 volte (all'inizio, dopo 4 settimane e dopo 8 settimane di allenamento) in merito alla loro massima forza volontaria isometrica (MVC), e all'esecuzione di contrazioni trapezoidali isometriche sub massimali (15, 35, 50, 70% MVC). Durante questi test è stata registrata l'attività elettrica del muscolo vasto laterale, attraverso l'elettromiografia di superficie ad alta densità (HDsEMG). Per testare le differenze nei diversi time point, è stata eseguita un ANOVA a due vie per misure ripetute, e ove possibile, un post hoc di Bonferroni.

Risultati: È stato riscontrato un aumento significativo ($p=0.011$) dell'MVC del ~19% tra T0 e T4, e un aumento del ~24% tra T0 e T8 ($p=0.002$). La frequenza di scarica media è aumentata del ~7% tra T0 e T8 a un'intensità di forza pari al 50% MVC ($p=0.034$), mentre è aumentata del ~3% tra T0-T4 ($p=0.005$), e del ~7% tra T0-T8 ($p=0.002$) al 70% MVC. La frequenza di scarica al reclutamento ha registrato un aumento del ~5% tra T0 e T4 ($p=0.025$) e un aumento dell' ~8% tra T0 e T8 ($p=0.019$) al 70%MVC, mentre la frequenza di scarica allo steady state è aumentata del ~3% solo tra T0 e T4 ($p=0.012$). Le soglie di reclutamento e dereclutamento assolute sono aumentate rispettivamente del ~19% ($p=0.025$) e del ~18% ($p=0.029$) da T0 a T8. Le soglie di reclutamento e dereclutamento relative invece non sono state alterate dal programma di allenamento.

Conclusioni: Il nostro studio ha dimostrato che 8 settimane di allenamento contro resistenza sono in grado di indurre degli adattamenti a livello neuromuscolare, i quali si traducono in un aumento della frequenza di scarica e delle soglie di reclutamento e dereclutamento assolute durante l'esecuzione di rampe sub massimali isometriche.

1. INTRODUZIONE

1.1 DEFINIZIONE E FUNZIONAMENTO DELLE UNITÀ MOTORIE

Il sistema nervoso trasmette gli impulsi elettrici necessari per l'attivazione muscolare, mentre il muscolo converte questi input elettrochimici in output meccanico.

Il sistema nervoso centrale (SNC), composto da encefalo e midollo spinale, riceve i segnali afferenti provenienti da recettori presenti in tutto il corpo, elabora le informazioni, programma ed invia il comando motorio di attivazione alla muscolatura coinvolta. Dunque, dalle regioni corticali, il comando motorio viene trasmesso a livello spinale a popolazioni di neuroni chiamati motoneuroni, i quali attraverso i rispettivi assoni conducono il segnale efferente alle fibre muscolari. Qui, a livello della giunzione neuromuscolare, l'impulso nervoso provoca il rilascio di neurotrasmettitori, i quali inducono un potenziale d'azione nelle fibre muscolari, generando la contrazione. Ogni fibra muscolare è innervata da un solo motoneurone; l'insieme del motoneurone e delle fibre che esso innerva (circa 300 fibre per i muscoli più piccoli, e >1000 per i muscoli più grandi) formano l'unità motoria (UM) (Liddell & Sherrington, 1925).

La forza espressa dal muscolo viene regolata dal SNC attraverso una modulazione dell'attività delle UM, in particolare dal numero di UM reclutate e dalla frequenza di scarica dei potenziali d'azione (Duchateau & Enoka, 2011).

Le UM appartenenti a un muscolo vengono reclutate secondo un ordine prestabilito, chiamato "reclutamento ordinato": questo processo si basa sul "principio della dimensione", anche conosciuto come principio di Henneman (Henneman, 1957). Elwood Henneman infatti nel 1957 dimostrò che singoli assoni motori appartenenti a un filamento della radice ventrale venivano reclutati in maniera ordinata man mano che la stimolazione elettrica del nervo sciatico aumentava, e che man mano che questa diminuiva interrompevano il rilascio del potenziale d'azione nell'ordine inverso rispetto al quale erano stati reclutati. Questa scoperta venne poi generalizzata a tutti i neuroni, e nel 1977 Henneman formalizzò la sua teoria affermando che "il numero di input eccitatori richiesti per far scaricare un motoneurone, l'energia che esso trasmette tramite gli impulsi, il numero di fibre che rifornisce, le proprietà contrattili delle UM che innerva, [...] sono strettamente correlate alla sua dimensione". Sulla base di questo principio, inizialmente vengono reclutate UM con una bassa soglia di attivazione, composte da motoneuroni di dimensioni ridotte, e innervanti fibre muscolari a contrazione lenta, maggiormente resistenti alla fatica (fibre di tipo I), le quali esprimono livelli di forza inferiori. Successivamente invece verranno reclutate UM ad alta soglia di attivazione, composte

da motoneuroni di dimensioni maggiori, innervanti fibre muscolari a contrazione rapida, con minore resistenza alla fatica (fibre di tipo IIa-IIx), le quali esprimono livelli di forza maggiori. Dunque, l'ordine di reclutamento delle UM è dettato dalle proprietà intrinseche del motoneurone, strettamente correlate con la sua dimensione (Henneman et al., 1965).

Una volta reclutate tutte le UM, il sistema nervoso è in grado di aumentare ulteriormente la forza espressa dal muscolo attraverso un incremento della frequenza di scarica del potenziale d'azione. La frequenza di scarica delle UM può variare in base al muscolo considerato e al livello di forza espressa. Ad esempio precedenti studi hanno mostrato che la frequenza di scarica misurata nel vasto laterale è di circa 9.3 impulsi al secondo (pps) per il muscolo vasto laterale (Kamen & Knight, 2004), mentre a 11pps nel bicipite brachiale (Wilson et al., 2020) al 10% dell'MVC. Queste frequenze possono aumentare significativamente in base allo sforzo richiesto, fino a raggiungere valori di 89pps al 20-25%MVC (Duchateau & Baudry, 2014), o di 96pps al 30-40%MVC (Van Cutsem et al., 1998) nei muscoli dorsiflessori della caviglia. Inoltre, anche il tipo di contrazione può influire sulla frequenza di scarica delle UM; è stato osservato infatti che durante rampe a contrazione lenta la frequenza di scarica aumenta progressivamente (5-25 impulsi al secondo), mentre durante contrazioni rapide vi è un'elevata velocità di scarica nella fase iniziale (> 100 impulsi al secondo), la quale tende a diminuire nel tempo (Duchateau & Baudry, 2014).

1.2 EFFETTI DELL'INVECCHIAMENTO SULLA PERFORMANCE NEUROMUSCOLARE E ALLENAMENTO CONTRO RESISTENZA

Il processo di invecchiamento comporta una progressiva diminuzione della massa muscolare e della capacità di generare forza, in una situazione nota come sarcopenia (Ballak et al., 2014). Oltre ad essa si verificano anche perdita dei motoneuroni, con conseguente minor numero di UM, rapporti di innervazione delle MU più grandi, e diminuzione della frequenza massima di scarica dei motoneuroni (Kamen & Knight, 2004). Questi effetti risultano in una complessiva riduzione della forza massima, della potenza massima e della forza esplosiva (Sakugawa et al., 2019), aumentando il rischio di cadute e riducendo la qualità della vita in età avanzata (Ballak et al., 2014).

Allo scopo di contrastare questi fenomeni sono state proposte varie forme di esercizio fisico, volte a potenziare la capacità del muscolo di esprimere forza e ad aumentare la massa muscolare, tra cui l'allenamento contro resistenza.

L'allenamento contro resistenza è una delle forme di allenamento più comuni, in quanto è noto migliorare la salute muscolo-scheletrica e le prestazioni atletiche (Folland & Williams, 2007). Inoltre, esso può giocare un ruolo determinante nella prevenzione di una serie di condizioni patologiche, tra cui osteoporosi, osteoartrite, diabete mellito, sindrome metabolica, e anche patologie di tipo neurodegenerativo, come Parkinson, sclerosi multipla e Alzheimer (Chung et al., 2016; Garber et al., 2011). Vista l'importanza di questo tipo di attività, l'ACSM raccomanda l'esecuzione di esercizi contro resistenza per ciascuno dei principali gruppi muscolari almeno 2-3 volte a settimana, oltreché esercizi riguardanti equilibrio, agilità e coordinazione (Garber et al., 2011).

L'aumento della forza muscolare conseguente all'allenamento contro resistenza è dovuto a due tipi di adattamenti: adattamenti neurali e adattamenti morfologici (o muscolari) (Folland & Williams, 2007; Pearcey et al., 2021; Sale, 1988).

Nel lungo periodo (> 4 settimane) quest'aumento sembrerebbe essere maggiormente associato a cambiamenti morfologici a carico del muscolo scheletrico (Folland & Williams, 2007). Questi cambiamenti coinvolgono principalmente un aumento dell'area della sezione trasversale delle fibre muscolari (CSA), un incremento della percentuale di fibre di tipo IIA, un incremento delle dimensioni complessive del muscolo (valutate in termini di CSA o volume) e una variazione dell'angolo di pennazione delle fibre muscolari (Aagaard et al., 2001; Franchi et al., 2014).

D'altro canto, numerose evidenze ci suggeriscono che questi adattamenti morfologici si manifestino soltanto in minor misura nelle prime settimane di allenamento contro resistenza, non contribuendo in modo sostanziale a spiegare il marcato e iniziale incremento di forza muscolare (Del Vecchio et al., 2019). Per questo motivo, numerosi autori hanno teorizzato prima (Sale, 1988), e dimostrato in seguito che gran parte dell'aumento iniziale della forza muscolare sia attribuibile ad adattamenti di natura neurale. Difatti, ricerche pregresse hanno spiegato i possibili potenziali meccanismi neurali, quali la riduzione dell'inibizione intracorticale, l'aumento dell'eccitabilità corticospinale e dei motoneuroni, incremento nella sincronizzazione delle UM e diminuzione della coattivazione degli antagonisti (Casolo et al., 2021).

I meccanismi neurali di maggiore interesse per il nostro studio riguardano la cosiddetta "ultima via comune" o "*final common pathway*" del SNC, ovvero l'UM. In particolare, abbiamo studiato alcune proprietà dell'UM quali la frequenza di scarica (DR, discharge rate) e la soglia di reclutamento (RT, recruitment threshold) e soglia di dereclutamento (DT, derecruitment threshold) e le abbiamo comparate prima e in seguito ad un programma di allenamento per studiarne gli adattamenti. Kamen and Knight (2004) nel loro studio, condotto su 15 partecipanti (8 giovani, 7 anziani) hanno

somministrato un protocollo di allenamento contro resistenza della durata di 6 settimane. Attraverso l'utilizzo dell'EMG intramuscolare, hanno riscontrato nel muscolo vasto laterale un aumento della DR sia nei giovani (+15%) sia negli anziani (+49%), durante delle contrazioni isometriche massimali (MVC), accompagnate da un aumento della forza muscolare rispettivamente del 29% e 36%. Non sono state riscontrate invece differenze significative nella DR per contrazioni submassimali al 10%MVC e 50%MVC.

Ciò ci porta a pensare che nelle prime settimane di allenamento, durante le quali non vengono osservati cambiamenti morfologico-strutturali del muscolo, sia il sistema nervoso a giocare un ruolo cruciale nell'aumento della forza muscolare, attraverso un incremento della DR delle UM. Secondo Kamen & Knight (2004) questo rapido intervento della DR potrebbe essere legato a un cambiamento nelle vie discendenti che coinvolgono questi muscoli.

Risultati simili sono stati riscontrati nei muscoli abduttori del quinto dito della mano nello studio di Patten et al. (2001), il quale ha coinvolto 12 partecipanti (6 giovani e 6 anziani), somministrando un protocollo di allenamento contro resistenza di 6 settimane, e nello studio di Vila-Chã et al. (2010), il quale ha coinvolto 30 partecipanti giovani, valutando i cambiamenti nel comportamento delle UM dei muscoli estensori del ginocchio in seguito a un protocollo di allenamento contro resistenza di 6 settimane. Lo studio di Pucci et al. (2006) e di Rich & Cafarelli (2000), riguardanti un protocollo di allenamento contro resistenza isometrico dei muscoli estensori del ginocchio, rispettivamente della durata di 3 e 8 settimane, condotti entrambi su 20 soggetti giovani, non hanno invece riscontrato alcuna differenza nella DR al 50%, 75% e 100%MVC nello studio di Pucci, e al 50%MVC in quello di Cafarelli.

Lo studio di Del Vecchio et al. (2019), che ha implementato un protocollo di allenamento contro resistenza isometrico di 4 settimane ai muscoli flessori dorsali della caviglia (tibiale anteriore) e ha coinvolto 25 giovani adulti, ha invece riscontrato un aumento significativo della DR e una diminuzione significativa della RT relativa.

Sterczala et al. (2020), in uno studio condotto su 16 uomini sani in età universitaria, non ha invece riscontrato alcuna differenza significativa nella RT e DR al 70%MVC, in seguito a un protocollo di allenamento contro resistenza di 8 settimane.

Infine, Orsatto et al. (2023), in uno studio condotto su 17 anziani (12 donne, 5 uomini) hanno valutato come variava la DR nelle UM del soleo in seguito a un protocollo di allenamento contro resistenza di 6 settimane. Essi hanno riscontrato un aumento significativo della DR in rampe di contrazione triangolari al 20% di MVT (maximum voluntary torque).

È bene precisare che ad oggi vi è soltanto un numero esiguo di studi che si è concentrato sull'analisi degli adattamenti a livello dell'UM che avvengono nelle prime settimane di allenamento. Per questo motivo, i meccanismi neurali alla base del rapido e marcato aumento della forza muscolare nelle prime settimane di allenamento sono ancora poco noti (Duchateau et al., 2006). Inoltre, questa poca chiarezza sembrerebbe essere attribuibile anche alle differenti metodologie adottate dai precedenti studi, dalla ridotta dimensione del campione, dai differenti muscoli studiati, dai diversi protocolli di allenamento (tipologia di esercizio e durata) nonché dalle differenti tecniche impiegate per studiare l'attività delle UM (ad es. EMG intramuscolare vs di superficie) (Elgueta-Cancino et al., 2022).

Gli studi finora menzionati hanno utilizzato per la registrazione dell'attività elettrica muscolare l'EMG intramuscolare (Kamen & Knight, 2004; Patten et al., 2001), l'EMG di superficie (Sterczala et al., 2020) o entrambe (Pucci et al., 2006; Rich & Cafarelli, 2000; Vila-Chã et al., 2010); solamente gli studi di Del Vecchio et al. (2019) e Orssatto et al. (2023) hanno utilizzato l'elettromiografia di superficie ad alta densità (HDsEMG). Questa tecnica, la stessa utilizzata nel nostro studio, fornisce un campionamento spazio-temporale dei potenziali d'azione delle UM, a partire dal quale possiamo identificare i singoli istanti di scarica di grandi popolazioni rappresentative (0-70% MVC) di UM reclutate durante contrazioni volontarie (Del Vecchio et al., 2020). Essa rappresenta un significativo avanzamento rispetto alle tradizionali tecniche di registrazione del segnale, in quanto, a differenza dell'EMG intramuscolare, è una tecnica non invasiva che utilizza elettrodi di superficie posti sulla pelle, e consente la registrazione dell'attività elettrica di un'area muscolare più ampia. L'EMG intramuscolare, infatti, utilizzando elettrodi ad ago, pur essendo molto precisa, registra l'attività di poche UM, le quali potrebbero non essere rappresentative dell'intera popolazione di UM del muscolo. Questo problema viene risolto dall'HDsEMG, la quale può registrare simultaneamente l'attività di molte unità motorie, fornendo un quadro più rappresentativo. Inoltre, utilizzando una matrice densa di elettrodi, permette una valutazione più accurata dell'attività muscolare rispetto all'EMG di superficie.

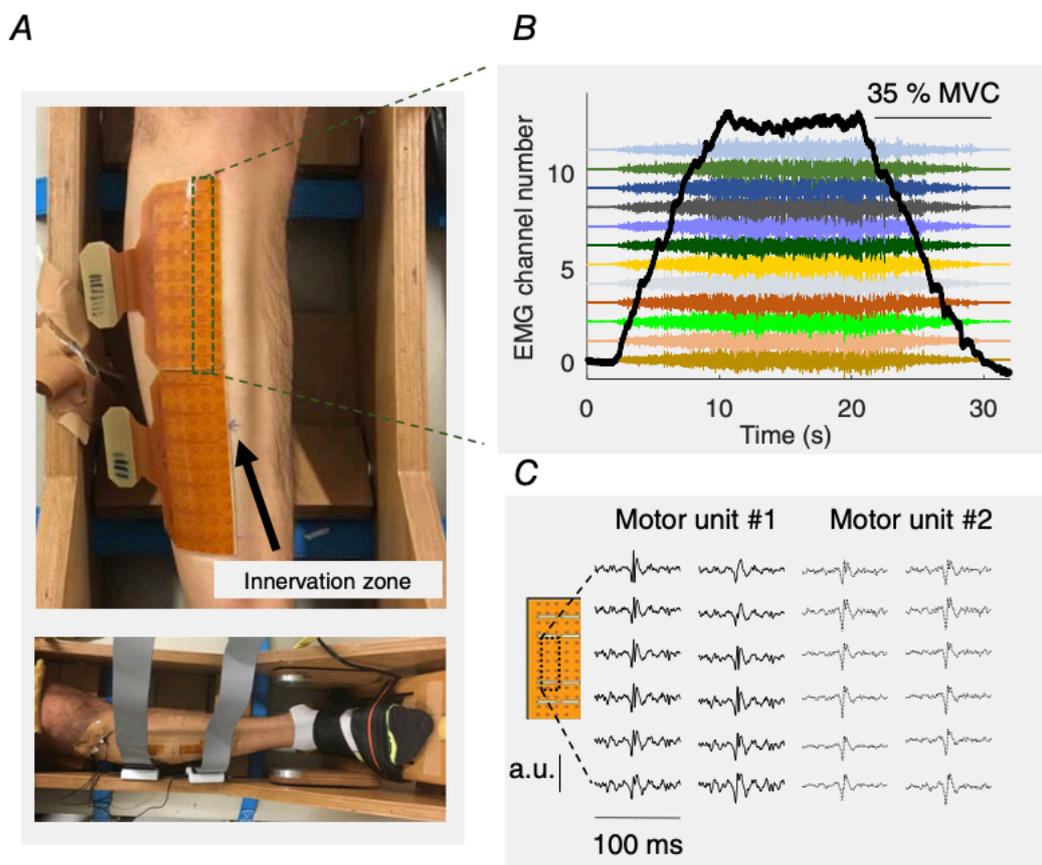


Figura 1. Setup sperimentale e decomposizione dell'unità motoria con HDsEMG, tratto dallo studio di Del Vecchio et al. (2019).

1.3 SCOPO DELLO STUDIO

Considerando le problematiche riscontrate negli studi attuali sugli adattamenti neurali indotti dall'allenamento contro resistenza, e la scarsità di ricerche che hanno implementato protocolli di allenamento contro resistenza di 8 settimane (Rich & Cafarelli, 2000; Sterczala et al., 2020) su una popolazione anziana, il nostro obiettivo è stato quello di investigare gli adattamenti neurali a livello dell'UM a seguito di un protocollo di allenamento contro resistenza di 8 settimane, concentrandoci in particolare sulle proprietà delle UM del muscolo vasto laterale.

2. MATERIALI E METODI

2.1 RECLUTAMENTO DEI PARTECIPANTI

I partecipanti allo studio sono stati reclutati attraverso conoscenza diretta, locandine o social media. Innanzitutto, hanno compilato un questionario conoscitivo, al fine di valutare possibili motivi di esclusione. In particolare, il questionario creato ad hoc chiedeva informazioni circa l'età (>65 anni), massa corporea, statura, lo stato di salute (ad es. patologie pregresse, interventi chirurgici subiti, assunzione di farmaci), le abitudini alimentari e il livello di attività fisica. Poiché lo scopo del progetto era quello di indagare gli adattamenti neuromuscolari indotti dall'allenamento di resistenza, era necessario che i partecipanti fossero fisicamente inattivi o almeno non coinvolti in regolare pratica di esercizio contro resistenza, e che non soffrissero di patologie/disturbi che impedissero lo svolgimento di attività fisica ad alta intensità.

	OLD (N=7)
STATURA (m)	1.75 ± 0.05
MASSA CORPOREA (kg)	80.28 ± 14.89
BMI (kg/m ²)	26.06 ± 3.65
% FAT	30.13 ± 5.73
LEAN MASS (g)	52.48 ± 6.07
% FAT RL	28.36 ± 6.03
LEAN mass RL (g)	8.97 ± 1.05

Tabella 1. Caratteristiche antropometriche dei partecipanti al baseline (T0). I dati sono presentati come media (M) ± deviazione standard (SD). BMI: body mass index; RL: right leg.

2.2 PANORAMICA DELLO STUDIO

Lo studio ha avuto una durata di circa 10 settimane. La prima e la decima sono state dedicate alla familiarizzazione e ai test pre-intervento, mentre le rimanenti 8 sono state dedicate al protocollo di allenamento contro resistenza.

Inizialmente i partecipanti sono stati sottoposti a una prima seduta di familiarizzazione, della durata di un'ora circa. Questa aveva lo scopo di familiarizzare i partecipanti con il test di valutazione neuromuscolare, e consisteva nell'esecuzione di contrazioni isometriche massimali e sub-massimali. Inoltre, in questa seduta venivano prese per ciascun individuo le specifiche della configurazione del dinamometro isometrico, tra cui l'angolo ginocchio, l'angolo dello schienale, cm lunghezza della seduta, le quali sono state poi utilizzate nei successivi test (T0, T4 e T8) per garantire una corretta standardizzazione ed evitare che i risultati relativi alla forza espressa fossero influenzati da variazioni di questi parametri. Durante la prima seduta, inoltre, è stata svolta la DXA per analizzare la composizione corporea.

Dopo circa una settimana i partecipanti sono stati sottoposti al test iniziale di valutazione neuromuscolare, indicato come T0. Questo test ha valutato la massima forza volontaria isometrica mediante la massima contrazione volontaria (MVC), accompagnate dalla registrazione dell'attività mioelettrica del muscolo vasto laterale attraverso elettromiografia di superficie ad alta densità (HDsEMG). Una volta svolto il test, i soggetti hanno iniziato il protocollo di allenamento contro resistenza della durata di 8 settimane, strutturato in 3 allenamenti a settimana (vedere paragrafo 2.6 per maggiori dettagli). Al termine del primo e del secondo mese di allenamento ciascun partecipante è stato sottoposto nuovamente al test di valutazione neuromuscolare, indicati rispettivamente come T4 e T8. La presenza di un test iniziale o uno intermedio e uno finale ci ha permesso di studiare l'andamento temporale degli adattamenti neuromuscolari nelle prime settimane di allenamento.

2.3 TEST DI VALUTAZIONE NEUROMUSCOLARE

2.3.1 Configurazione del dinamometro e protocollo sperimentale

Al T0, T4 e T8, i partecipanti sono stati posizionati su un dinamometro isometrico su misura, regolando schienale e tutore in base all'altezza e lunghezza degli arti inferiori dei soggetti.

Al fine di evitare possibili compensi durante l'esecuzione del test, i partecipanti sono stati posizionati sul dinamometro e supportati mediante degli strap a velcro posizionati su spalle, anche, coscia e caviglia. Una volta standardizzata la posizione del soggetto, sono stati posizionati gli elettrodi HDsEMG (paragrafo 2.4); i partecipanti hanno poi eseguito delle massime contrazioni isometriche volontarie (MVC), seguite da una serie di contrazioni sub-massimali.

2.3.2 Massima Contrazione Volontaria isometrica (MVC)

I partecipanti sono stati sottoposti innanzitutto a un riscaldamento standardizzato, caratterizzato da 7 contrazioni isometriche sub-massimali (3 x 50%, 3 x 75%, 1 x 90%), in base al massimo valore di forza percepito. In seguito, hanno eseguito 3-5 prove massimali, intervallate da circa 1 minuto di recupero, nelle quali dovevano esprimere la massima forza in 1 secondo e mantenerla per 3-5 secondi, incitati dagli operatori durante ciascuna prova. Il più alto valore di massima forza volontaria isometrica (MViF) rilevato è stato utilizzato per determinare l'intensità delle contrazioni sub-massimali successivamente eseguite.

2.3.3 Contrazioni trapezoidali sub-massimali isometriche

Alcuni minuti dopo aver eseguito le MVC, i partecipanti sono stati sottoposti a una serie di rampe trapezoidali ad intensità sub-massimale. Queste erano caratterizzate da una fase ascendente, nella quale vi era un aumento lineare della forza fino all'intensità stabilita, una fase di *steady state (SS)*, caratterizzata dal mantenimento della forza target per 10 secondi, e una fase discendente, con un decremento lineare della forza fino ai livelli di partenza.

Una traccia di forza proiettata su uno schermo posto di fronte ai partecipanti li aiutava nell'aumentare/diminuire il più precisamente possibile la forza espressa. La velocità di contrazione (rateo di sviluppo della forza) è stata mantenuta costante al 5% MViF·s⁻¹. Ogni partecipante è stato sottoposto a 2 prove per ciascun livello di forza (15-35-50-75% MViF), intervallate da 2-3 minuti di recupero, ed eseguite in forma randomizzata per limitare l'effetto della fatica neuromuscolare sulla performance.

L'utilizzo di diversi livelli di forza ha consentito lo studio del comportamento, proprietà ed eventuali adattamenti dell'unità motoria all'interno del range completo di reclutamento volontario del muscolo vasto laterale.

L'utilizzo di rampe trapezoidali inoltre ha permesso lo studio dei parametri nelle diverse fasi della contrazione (reclutamento, mantenimento e dereclutamento).

2.4 ACQUISIZIONE E ANALISI DEI SEGNALI DI FORZA E HDsEMG

2.4.1 Segnale di forza

Il segnale di forza acquisito dalla cella di carico è stato amplificato (x150) e campionato a 2048 Hz, poi convertito in digitale e sincronizzato con il rispettivo segnale elettromiografico mediante un

amplificatore multicanale di segnali bioelettrici (EMG-Quattrocento, OT Bioelettronica, Torino, Italia). Attraverso il software Matlab invece il segnale di forza registrato in mV è stato dapprima convertito in kg, rimuovendo l'offset di ciascuna prova, e successivamente filtrato con un filtro passa-basso di 4° ordine.

2.4.2 Segnale HDsEMG

L'attività mioelettrica prodotta dal muscolo vasto laterale durante le contrazioni volontarie è stata registrata grazie a una matrice di 64 elettrodi (13 colonne, 5 righe; diametro elettrodi: 1 mm; distanza interelettroica: 8 mm; OT Bioelettronica, Torino, Italia) posizionata sul ventre muscolare.

Le cavità della matrice sono state ricoperte di pasta conduttiva (SpesMedica, Battipaglia, Italia) al fine di ottimizzare il contatto cute-elettrodi, semplificando la registrazione del segnale HDsEMG; inoltre, per migliorare la conduzione elettrica del segnale dalla zona intramuscolare ai siti di registrazione, la pelle è stata preparata attraverso: 1) depilazione, 2) scrub esfoliante e 3) pulizia con alcool (70% etanolo).

Successivamente un operatore esperto ha applicato la matrice superficialmente sul ventre muscolare del vasto laterale mediante *foam* biadesivi monouso.

Il profilo della matrice e i principali punti di riferimento sono stati ricalcati su un foglio trasparente, utilizzato nei test successivi (T4 e T8) come "guida" per riproporre un posizionamento identico della matrice, al fine di standardizzare l'acquisizione dei dati.

Il segnale elettromiografico è stato registrato in configurazione monopolare dal software OTBioLab+, campionato a 2048 HZ, sincronizzato alla fonte con il segnale di forza mediante lo stesso amplificatore multicanale e filtrato offline prima di essere decomposto.

Attraverso un algoritmo di decomposizione validato (*blind source separation* – DEMUSE) (Holobar et al., 2014; Holobar & Zazula, 2007) infatti è stato possibile scomporre il segnale HDsEMG, identificando in modo dettagliato il contributo individuale dato dalle diverse unità motorie reclutate durante la contrazione e la cui attività (sommatoria) concorre alla sua formazione.

Le prove di ciascun soggetto, registrate ai tre differenti time-point (T0, T4, T8) sono state decomposte e ispezionate visualmente secondo le linee guida disponibili (Del Vecchio et al., 2020). Questo scrupoloso processo di ispezione visuale ha consentito di analizzare i risultati della decomposizione, unità motoria per unità motoria, correggendo gli errori ed eliminando i duplicati all'occorrenza. Il parametro utilizzato per determinare l'accuratezza della decomposizione è stato il *pulse-to-noise ratio* (PNR); maggiore era il suo valore, maggiore era l'accuratezza dell'unità motoria identificata. Nello

specifico, nell'analisi sono state incluse solamente unità motorie con PNR > 26 dB. Le variabili di maggiore interesse ricavate da ciascuna unità motoria sono state:

- Soglia di reclutamento (Soglia Recl Abs/Relativa), livello minimo di forza, espresso in termini assoluti o relativi (%MViF), necessario per attivare una determinata unità motoria;
- Soglia di dereclutamento (Soglia DeRecl Abs/Relativa), livello di forza, espresso in termini assoluti o relativi (%MViF), al di sotto del quale un'unità motoria attivata durante la contrazione cessa di essere attiva;
- Frequenza di scarica delle UM (DR), ossia la frequenza con cui i potenziali d'azione vengono inviati dal motoneurone alle fibre muscolari che esso innerva durante la contrazione. Questa variabile è stata valutata nella fase di reclutamento (fase ascendente della rampa trapezoidale di contrazione), fase di steady state (fase centrale, di mantenimento della forza), e di dereclutamento (fase discendente della rampa).

2.5 PROTOCOLLO DI ALLENAMENTO CONTRO RESISTENZA

Dopo alcuni giorni dal test di valutazione neuromuscolare T0, i partecipanti hanno iniziato un protocollo di allenamento contro resistenza dinamico e progressivo della durata di 8 settimane.

Il protocollo prevedeva 3 allenamenti settimanali supervisionati, della durata di 1 ora circa, per un totale di 24 allenamenti. Ciascun allenamento era separato dal successivo da almeno 48 ore per favorire un adeguato recupero.

Gli allenamenti hanno mantenuto sempre la medesima struttura: riscaldamento, parte centrale di *resistance training*, e parte finale di defaticamento.

L'allenamento proposto era di tipo *total body*, dunque coinvolgente tutti i principali distretti muscolari, ponendo però maggiore enfasi sul potenziamento degli arti inferiori, considerato l'obiettivo del nostro studio.

Gli esercizi si sono mantenuti invariati durante tutto il protocollo d'allenamento, ed erano in sequenza: *leg press*, *chest press*, affondi, rematore, *leg extension*, alzate laterali, arm curl, *crunches*.

La prima seduta è stata di familiarizzazione, spiegando e facendo provare ai soggetti, con carichi ridotti, gli esercizi che avrebbero poi dovuto svolgere nelle sedute successive. Nella seconda seduta invece sono stati calcolati i massimali alla *leg press* e *leg extension* secondo la formula di Brzycki ($1RM = \text{peso sollevato} / [1.0278 - (0.0278 \times \text{numero di ripetizioni})]$) (Brzycki, 1993), al fine di adattare l'intensità degli allenamenti successivi alla forza espressa dai soggetti. Il calcolo dei massimali è stato poi ripetuto anche nella seduta d'allenamento successiva ai test T4 e T8.

L'intensità dell'allenamento è stata modulata seguendo il protocollo già utilizzato precedentemente in letteratura da (Moro et al., 2018). Nella tabella 2 viene riportata la progressione del carico adottata.

Sedute	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Data												
Serie / reps	2x15	2x15	3x15	3x12	3x12	3x12						
Intensità	60%	60%	60%	60%	60%	60%	65%	65%	65%	67%	67%	67%
Carico												

Sedute	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Data												
Serie / reps	3x12	3x12	3x12	3x12	3x12	3x12	3x10	3x10	3x10	3x10	3x10	3x10
Intensità	70%	70%	70%	73%	73%	73%	75%	75%	75%	78%	78%	78%
Carico												

Tabella 2. Serie, ripetizioni e percentuale di carico utilizzate durante il protocollo di allenamento.

2.6 ANALISI STATISTICA

Gli effetti prodotti dall'allenamento contro resistenza su MVC e soglie di reclutamento/dereclutamento sono stati valutati utilizzando per l'analisi statistica l'ANOVA a una via per misure ripetute; le variazioni relative alla DR sono state invece analizzate attraverso il Two-Way ANOVA per misure ripetute, considerando come fattori l'intensità (15-35-50-70%MVC) e i vari time-point (T0, T4, T8). I paragoni relativi alle singole variabili tra i diversi time-point (T0 vs T4, T4 vs T8 e T0 vs T8) sono stati corretti applicando il fattore di correzione di Tukey. I risultati sono stati espressi come media dei valori. Tutte le analisi statistiche sono state condotte utilizzando il software Graphpad Prism ver 10.2.3. Per tutti i test, il livello di significatività è stato stabilito a $\alpha < 0.05$.

3. RISULTATI

3.1 MVC

Per quanto riguarda il cambiamento della massima forza volontaria isometrica, misurata mediante MVC, l'ANOVA a una via per misure ripetute ha rilevato un effetto tempo significativo ($p < 0.001$). In particolare, il post hoc ha mostrato un aumento significativo del $19\% \pm 15\%$ ($P = 0.011$) tra T0 e T4, e un aumento del $24\% \pm 15\%$ ($P = 0.002$) tra T0 e T8.

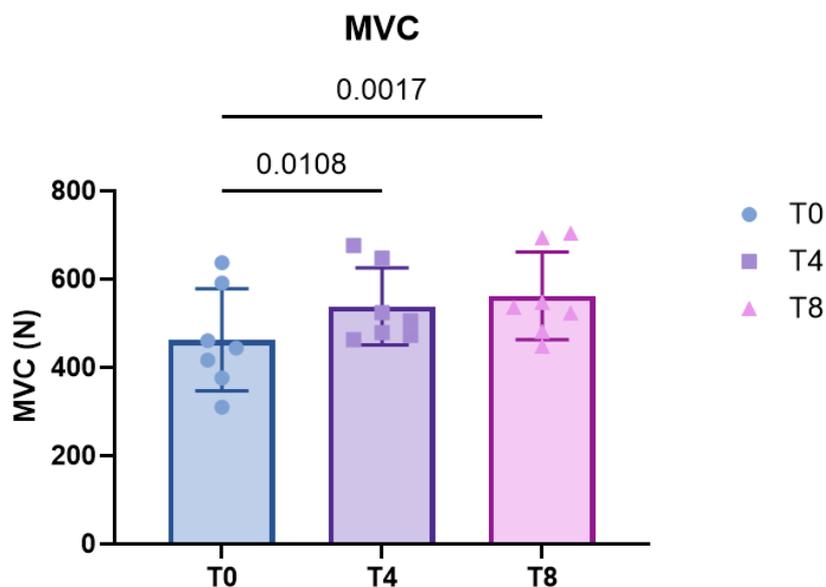


Figura 2. Cambiamenti nell'MVC nei 3 diversi time-point, in seguito al protocollo di allenamento di 8 settimane.

3.2 UNITÀ MOTORIE

Considerando le prove eseguite da ogni soggetto per ogni livello di forza e nei tre time-point, sono state identificate complessivamente 774 unità motorie dal muscolo vasto laterale. In media, sono state rilevate ~27 unità motorie per contrazione per partecipante.

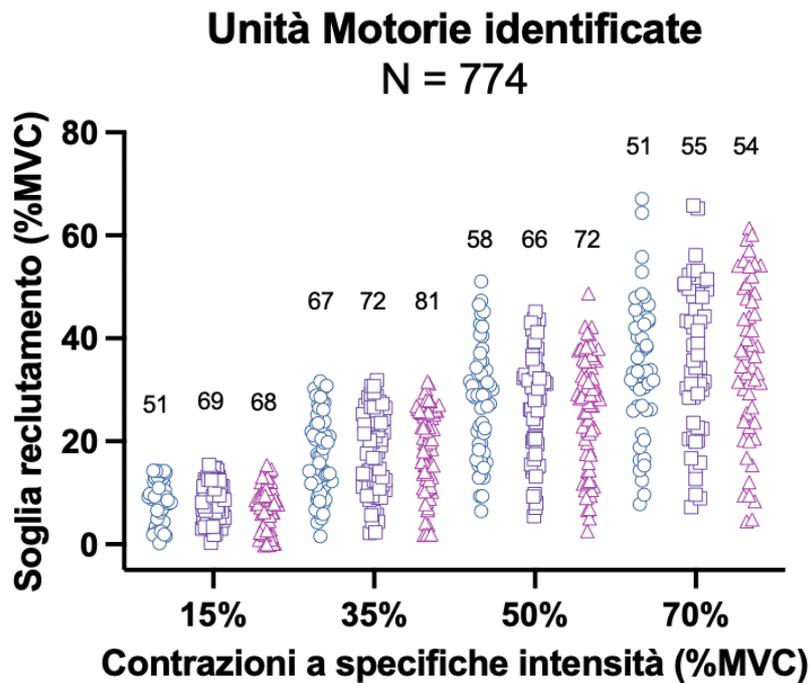


Figura 3. Numero di UM nei 4 livelli di forza (15%, 35%, 50%, 70%MVC), e nei vari time point (T0 cerchi blu, T4 quadrati viola, T8 triangoli rosa).

3.3 FREQUENZA DI SCARICA

Per quanto riguarda la DR all (*Discharge Rate, DR all*), calcolata sull'intera contrazione, sono stati riscontrati un effetto tempo e un effetto intensità significativi ($P=0.001$; $P=0.004$), mentre l'interazione tempo x intensità mostra una forte tendenza alla significatività ($P=0.059$). In particolare, a un'intensità di forza pari al 50% MVC è stato rilevato un aumento del 7% ($P=0.034$) tra T0 e T8, mentre al 70% MVC è stato rilevato un aumento del 3% ($P=0.005$) tra T0-T4, e un aumento del 7% ($P=0.002$) tra T0-T8.

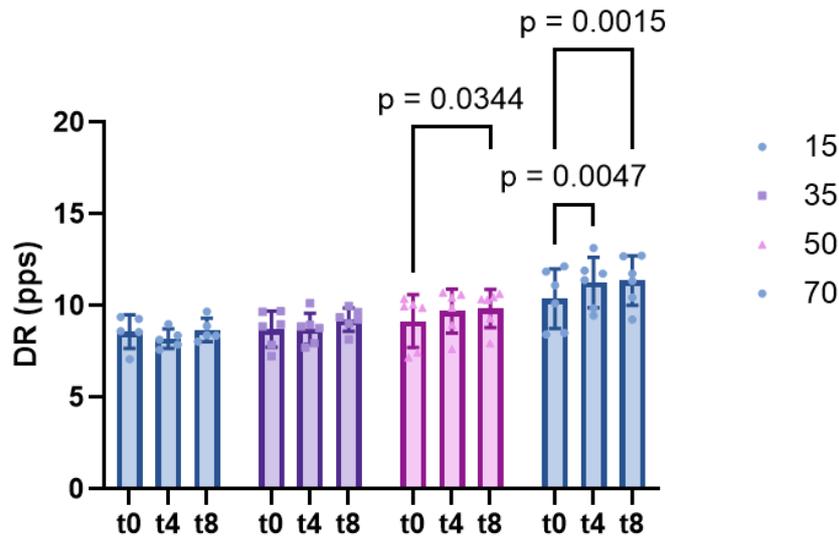


Figura 4. Cambiamenti nella DR all per ciascuno dei 4 livelli di forza (15% in azzurro, 35% in viola, 50% in rosa, 70%MVC in blu), e nei vari time point (T0, T4, T8).

Considerando la DR al reclutamento (*Discharge Rate, DR reclutamento*) è stato riscontrato un effetto tempo statisticamente significativo ($P=0.030$). In particolare, sono state riscontrate differenze significative nella DR a intensità pari al 70%MVC, con un aumento del 5% ($P=0.025$) tra T0 e T4, e un aumento del 8% ($P=0.019$) tra T0 e T8.

Relativamente alla DR allo steady state (*Discharge Rate, DR steady state*) è stato riscontrato un effetto tempo x intensità tendente alla significatività ($P=0.053$). In particolare, l'unica differenza significativa allo steady state è emersa nella rampa al 70% MVC, con un aumento del 3% ($P=0.012$) tra T0 e T4.

Per quanto riguarda la DR nella fase di dereclutamento (*Discharge Rate, DR de reclutamento*) non sono state riscontrate differenze statisticamente significative.

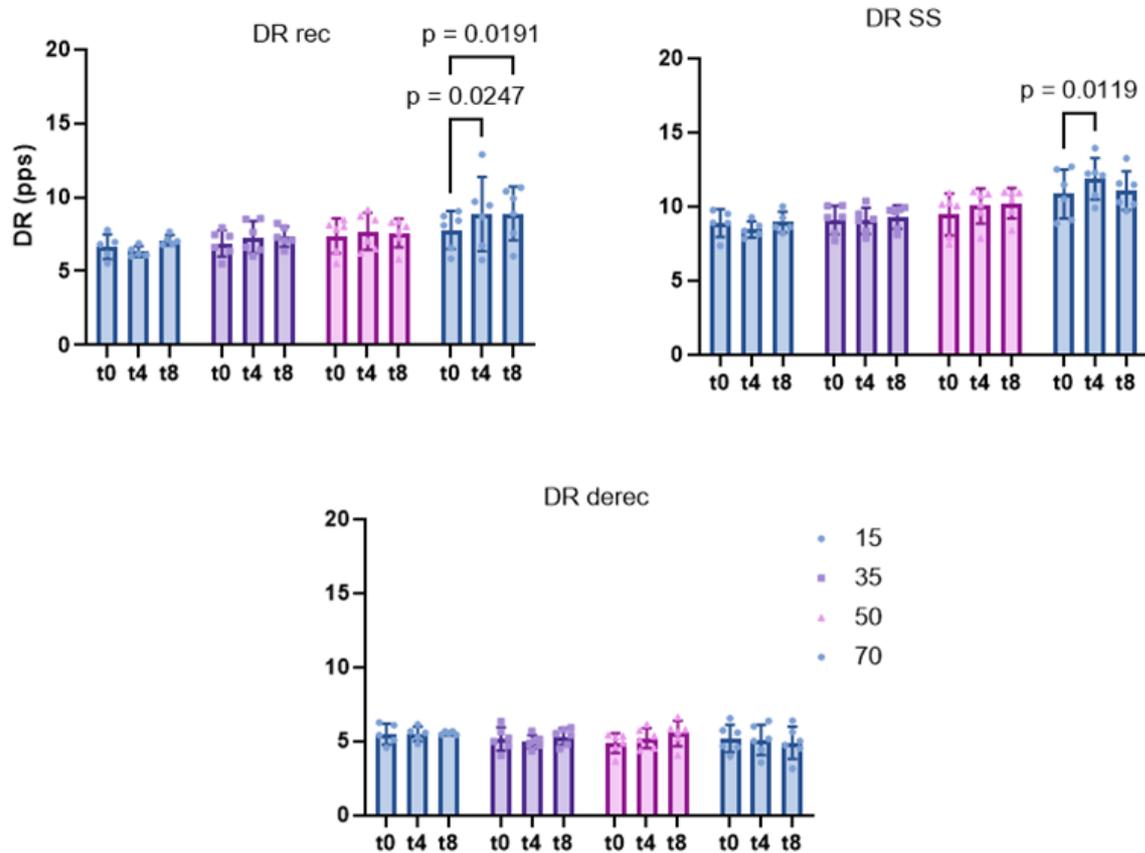


Figura 5. Cambiamenti nella DR delle unità motorie al reclutamento (Discharge Rate, DR reclutamento, a sinistra), allo steady state (Discharge Rate, DR steady state, in centro) e al dereclutamento (Discharge Rate, DR de reclutamento, a destra), per ciascun livello di forza (15%MVC in azzurro, 35%MVC in viola, 50%MVC in rosa, 70%MVC in blu), e nei 3 diversi time-point (T0, T4, T8).

3.4 SOGLIE DI RECLUTAMENTO E DERECLUTAMENTO

L'ANOVA a una via ha mostrato un effetto tempo significativo riguardo alla soglia di reclutamento assoluta (*Absolute Recruitment Threshold*) e la soglia di dereclutamento assoluta (*Absolute Derecruitment Threshold*) ($P=0.049$ e $P=0.029$, rispettivamente). In particolare, è emerso un aumento del 19% ($P=0.025$) tra T0 e T8 nella soglia di reclutamento assoluta, e del 18% ($P=0.029$) tra T0 e T8 per la soglia di dereclutamento assoluta.

Per quanto riguarda invece la soglia di reclutamento relativa (*Relative Recruitment Threshold*) e la soglia di dereclutamento relativa (*Relative Derecruitment Threshold*), non sono emerse differenze statisticamente significative.

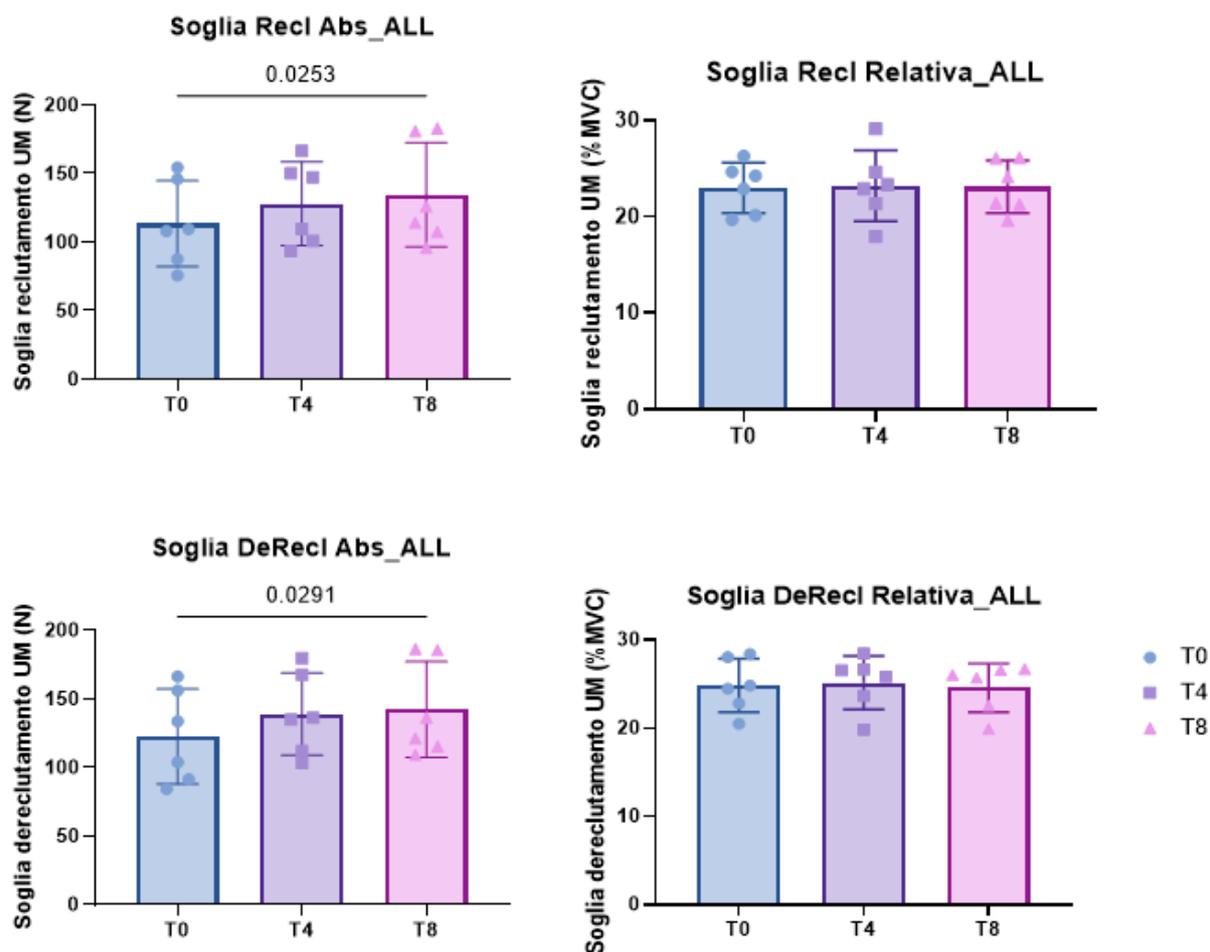


Figura 6. Cambiamenti della soglia di reclutamento (assoluta e relativa), e nella soglia di dereclutamento (assoluta e relativa), espressi in Newton (N, a sinistra) e normalizzati (%MVC, a destra), nei 3 diversi time point (T0 in azzurro, T4 in viola, T8 in rosa).

4. DISCUSSIONE

Lo scopo del nostro studio è stato quello di indagare gli adattamenti neurali che avvengono nel muscolo dell'anziano in seguito ad 8 settimane di allenamento contro resistenza. Gli adattamenti sono stati analizzati attraverso lo studio dell'attività e delle proprietà delle UM; ciò è stato reso possibile grazie all'utilizzo della tecnica HDsEMG, che ci ha permesso di identificare e studiare gli adattamenti in popolazioni rappresentative di UM in modo accurato e soprattutto non invasivo.

I dati ottenuti sono stati confrontati tra i diversi time point (T0, T4 e T8), e alle diverse intensità di forza (15, 35, 50, 70%MVC); le variabili di maggior interesse per il nostro studio sono state l'MVC, la DR (media, al reclutamento, allo steady state e al de reclutamento) e le soglie di reclutamento/de reclutamento (sia in termini assoluti che relativi).

4.1 CAMBIAMENTI DELL'MVC

L'MVC ha mostrato un aumento significativo del $19\% \pm 15\%$ tra T0 e T4, e un aumento del $24\% \pm 15\%$ tra T0 e T8. Questi risultati sono in linea con altri studi già presenti in letteratura, i quali hanno indagato gli adattamenti dei muscoli estensori del ginocchio in seguito ad allenamento contro resistenza. Lo studio di Orsatto et al. (2023) ad esempio ha osservato un aumento medio del 25.17% nel muscolo soleo in seguito a un protocollo di allenamento contro resistenza di 6 settimane (3x6 ripetizioni, 2 volte a settimana) total body. Lo studio di Kamen & Knight (2004), ha anch'esso riscontrato, in seguito a un protocollo di allenamento contro resistenza di 6 settimane (3x10 ripetizioni, 3 volte a settimana, all'85%MVC) dei muscoli estensori del ginocchio, un aumento del 29 e 36% della MVC rispettivamente in giovani e anziani. Questi due studi hanno avuto una durata inferiore al nostro (6 settimane vs. 8 settimane). Lo studio di Orsatto et al. (2023), ha optato, come nel nostro caso, per un protocollo total body, mentre Kamen & Knight (2004) hanno focalizzato l'allenamento sugli arti inferiori.

Lo studio di Orsatto e colleghi (2023) ha ottenuto un aumento dell'MVC simile al nostro. Il maggiore aumento dell'MVC ottenuto invece da Kamen & Knight potrebbe essere dovuto all'utilizzo di carichi più elevati (85%MVC) e al fatto che l'allenamento fosse maggiormente specifico per il muscolo testato (estensori di ginocchio).

4.2 VARIAZIONI NELLA FREQUENZA DI SCARICA

DR reclutamento e DR steady state hanno mostrato un aumento significativo dopo 4 settimane di allenamento soltanto a intensità pari al 70%MVC. In particolare, nella fase di reclutamento sono stati riscontrati un aumento del 5% tra T0 e T4 e un aumento del 8% tra T0 e T8, solamente al 70%MVC; ciò significa che l'allenamento ha indotto un miglioramento dell'input neurale (frequenza di scarica) diretto alle fibre muscolari di dimensioni maggiori, e idealmente contenute nelle UM più grandi, ad alta soglia di reclutamento, sin dai primi istanti della contrazione.

I miglioramenti nella fase di steady state, ossia nella fase di mantenimento della forza, sono stati riscontrati in modo significativo nel primo periodo di allenamento, tra T0 e T4, con un aumento pari al 3%.

Nella fase di dereclutamento, ossia di progressiva disattivazione delle UM al fine di ridurre la forza muscolare, non sono state riscontrati cambiamenti significativi in seguito all'allenamento.

Questi risultati sono in linea con lo studio sopra citato di Kamen & Knight (2004), il quale ha osservato anch'esso un aumento della DR (+15% per i giovani, +49% per gli anziani), ma solamente al 100%MVC; non ha invece riscontrato differenze significative a intensità di contrazione più basse (10% e 50%MVC), come riscontrato nel nostro studio. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che entrambi gli studi hanno riguardato allenamenti a intensità di contrazione più elevate (60-78%MVC, >85%MVC), non fornendo uno stimolo di allenamento significativo alle fibre a contrazione lenta, e stimolando maggiormente le fibre a contrazione rapida, reclutate a intensità di contrazione maggiori. Lo studio di Del Vecchio et al. (2019) invece, condotto su soggetti giovani, in merito alla DR concorda parzialmente con quanto osservato dal nostro studio. In particolare, i ricercatori hanno riscontrato un aumento del 3.3 ± 2.5 pps della DR tra T0 e T4 nella fase di steady state. Tuttavia, contrariamente al nostro studio non ha osservato differenze significative durante la fase di reclutamento e dereclutamento. Questo potrebbe essere spiegato dal fatto che l'allenamento proposto da Del Vecchio, basato su contrazioni sub massimali isometriche, potrebbe avere allenato maggiormente la capacità delle UM di mantenere una DR costante, garantendo una contrazione prolungata, piuttosto che la capacità di attivare e disattivare le UM.

4.3 VARIAZIONI NELLA SOGLIA DI RECLUTAMENTO/DERECLUTAMENTO

Le soglie di reclutamento e di dereclutamento hanno mostrato un aumento significativo tra T0 e T8, rispettivamente del 19% e 18%, solamente in termini assoluti. Questo è dovuto probabilmente al fatto

che l'aumento delle soglie di reclutamento/dereclutamento è stato accompagnato in maniera proporzionale dall'aumento della forza muscolare dei partecipanti (MVC), mantenendo le soglie relative invariate. L'assenza di cambiamenti nella soglia di reclutamento/de reclutamento in termini relativi (% MVC) ci suggerisce che le strategie di reclutamento e de reclutamento non siano state alterate dall'allenamento. Al contrario, lo studio di Orssatto et al. (2023) ha ottenuto un aumento medio del 37.72% della soglia di reclutamento relativa. Questo potrebbe essere spiegato dal fatto che, nel nostro caso, l'aumento di MVC è avvenuto in maniera proporzionale all'aumento della soglia di reclutamento, mentre nello studio di Orssatto la soglia di reclutamento muscolare potrebbe essere aumentata in misura maggiore rispetto all'MVC. Inoltre, sottolineiamo che nello studio di Orssatto, i partecipanti svolgevano la fase concentrica degli esercizi in maniera esplosiva, mentre nel nostro caso la concentrica era eseguita in maniera controllata (3 sec).

Lo studio di Del Vecchio et al. (2019) ha invece riscontrato una diminuzione del 7.79% della soglia di reclutamento assoluta, e un aumento del 22.78% della soglia di dereclutamento assoluta. Per quanto riguarda le soglie relative, egli ha riscontrato una diminuzione del 19.23% della soglia di reclutamento relativa, e nessuna differenza significativa nella soglia di dereclutamento relativa. I differenti risultati ottenuti in questi studi e nel nostro ci porta a pensare che le strategie di reclutamento e dereclutamento siano dipendenti dal tipo di allenamento svolto e dal tipo di muscolo studiato. Tuttavia, futuri studi sono necessari per poter spiegare meglio i meccanismi neurali sottostanti all'allenamento contro-resistenza.

4.4 PUNTI DI FORZA DEL NOSTRO STUDIO

Tra i punti di forza del nostro studio emerge sicuramente l'utilizzo dell'HDsEMG, la quale ci ha consentito di analizzare grandi popolazioni di UM con un'elevata precisione. Questa tecnica rappresenta un notevole progresso nello studio delle proprietà delle UM, e ad oggi il nostro studio è uno dei pochi tra quelli menzionati ad averla utilizzata.

Un altro punto di forza del nostro studio è dato dalla sua durata; in letteratura sono infatti pochi gli studi che hanno indagato gli adattamenti neuromuscolari su un arco di tempo così lungo, fermandosi generalmente a un massimo di 6 settimane.

4.5 LIMITI DEL NOSTRO STUDIO

Il limite principale del nostro studio è rappresentato dal numero ridotto di partecipanti. Il nostro studio infatti ha coinvolto solamente 7 partecipanti, un numero esiguo considerando che gli studi sopra citati tendenzialmente coinvolgevano almeno 12-15 partecipanti. Questo campione ridotto può influenzare la generalizzabilità dei risultati, riducendo la capacità di trarre conclusioni rappresentative su una popolazione più ampia.

4.6. CONCLUSIONI

Il nostro studio ha dimostrato che 8 settimane di allenamento contro resistenza sono in grado di indurre degli adattamenti a livello neuromuscolare. In particolare, sono stati riscontrati cambiamenti nell'MVC, frequenza di scarica e soglie di reclutamento/dereclutamento assolute, analizzate tramite HDsEMG del muscolo vasto laterale. La forza massima volontaria è aumentata al termine del protocollo di allenamento; questo incremento è stato accompagnato da un aumento della frequenza di scarica nelle fasi di reclutamento e di *steady state*, solamente a intensità di contrazione elevate (70%MVC). Infine, anche le soglie di reclutamento e de reclutamento assolute hanno mostrato un aumento tra T0 e T8.

I risultati ottenuti dunque dimostrano l'importanza degli adattamenti neurali nell'espressione di forza in soggetti anziani, in seguito a un protocollo di allenamento contro resistenza.

BIBLIOGRAFIA

- Aagaard, P., Andersen, J. L., Dyhre-Poulsen, P., Leffers, A. M., Wagner, A., Peter Magnusson, S., Halkjær-Kristensen, J., & Simonsen, E. B. (2001). A mechanism for increased contractile strength of human pennate muscle in response to strength training: Changes in muscle architecture. *Journal of Physiology*, *534*(2), 613–623. <https://doi.org/10.1111/J.1469-7793.2001.T01-1-00613.X>
- Ballak, S. B., Degens, H., de Haan, A., & Jaspers, R. T. (2014). Aging related changes in determinants of muscle force generating capacity: a comparison of muscle aging in men and male rodents. *Ageing Research Reviews*, *14*(1), 43–55. <https://doi.org/10.1016/J.ARR.2014.01.005>
- Brzycki, M. (1993). Strength Testing—Predicting a One-Rep Max from Reps-to-Fatigue. *Journal of Physical Education, Recreation & Dance*, *64*(1), 88–90. <https://doi.org/10.1080/07303084.1993.10606684>
- Casolo, A., Del Vecchio, A., Balshaw, T. G., Maeo, S., Lanza, M. B., Felici, F., Folland, J. P., & Farina, D. (2021). Behavior of motor units during submaximal isometric contractions in chronically strength-trained individuals. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, *131*(5), 1584–1598. <https://doi.org/10.1152/JAPPLPHYSIOL.00192.2021>
- Chung, C. L. H., Thilarajah, S., & Tan, D. (2016). Effectiveness of resistance training on muscle strength and physical function in people with Parkinson’s disease: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Rehabilitation*, *30*(1), 11–23. https://doi.org/10.1177/0269215515570381/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_0269215515570381-FIG3.JPEG
- Del Vecchio, A., Casolo, A., Negro, F., Scorcelletti, M., Bazzucchi, I., Enoka, R., Felici, F., & Farina, D. (2019). 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*, *597*(7), 1873–1887. <https://doi.org/10.1113/JP277250>
- Del Vecchio, A., Holobar, A., Falla, D., Felici, F., Enoka, R. M., & Farina, D. (2020). Tutorial: Analysis of motor unit discharge characteristics from high-density surface EMG signals. *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, *53*. <https://doi.org/10.1016/J.JELEKIN.2020.102426>

- Duchateau, J., & Baudry, S. (2014). Maximal discharge rate of motor units determines the maximal rate of force development during ballistic contractions in human. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8(1 APR). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00234>
- Duchateau, J., & Enoka, R. M. (2011). Human motor unit recordings: Origins and insight into the integrated motor system. In *Brain Research* (Vol. 1409, pp. 42–61). <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2011.06.011>
- Duchateau, J., Semmler, J. G., & Enoka, R. M. (2006). Training adaptations in the behavior of human motor units. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 101(6), 1766–1775. <https://doi.org/10.1152/JAPPLPHYSIOL.00543.2006>
- Elgueta-Cancino, E., Evans, E., Martinez-Valdes, E., & Falla, D. (2022). The Effect of Resistance Training on Motor Unit Firing Properties: A Systematic Review and Meta-Analysis. In *Frontiers in Physiology* (Vol. 13). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.817631>
- Folland, J. P., & Williams, A. G. (2007). The adaptations to strength training : morphological and neurological contributions to increased strength. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 37(2), 145–168. <https://doi.org/10.2165/00007256-200737020-00004>
- Franchi, M. V., Atherton, P. J., Reeves, N. D., Flück, M., Williams, J., Mitchell, W. K., Selby, A., Beltran Valls, R. M., & Narici, M. V. (2014). Architectural, functional and molecular responses to concentric and eccentric loading in human skeletal muscle. *Acta Physiologica*, 210(3), 642–654. <https://doi.org/10.1111/APHA.12225>
- G- T Liddell, B. E., & Charles Sherrington, S. S. (1925). Recruitment and some other features of reflex inhibition. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character*, 97(686), 488–518. <https://doi.org/10.1098/RSPB.1925.0016>
- Garber, C. E., Blissmer, B., Deschenes, M. R., Franklin, B. A., Lamonte, M. J., Lee, I. M., Nieman, D. C., & Swain, D. P. (2011). Quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in apparently healthy adults: Guidance for prescribing exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 43(7), 1334–1359. <https://doi.org/10.1249/MSS.0B013E318213FEFB>
- Henneman, E. (1957). Relation between size of neurons and their susceptibility to discharge. *Science (New York, N.Y.)*, 126(3287), 1345–1347. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.126.3287.1345>
- Henneman, E. (1977). Functional organization of motoneuron pools: The size principle. . *Proc. Int. Union Physiol. Sci.*, 12, 50.

- Henneman, E., Somjen, G., & Carpenter, D. O. (1965). Functional significance of cell size in spinal motoneurons. *Journal of Neurophysiology*, 28, 560–580. <https://doi.org/10.1152/JN.1965.28.3.560>
- Holobar, A., Minetto, M. A., & Farina, D. (2014). Accurate identification of motor unit discharge patterns from high-density surface EMG and validation with a novel signal-based performance metric. *Journal of Neural Engineering*, 11(1). <https://doi.org/10.1088/1741-2560/11/1/016008>
- Holobar, A., & Zazula, D. (2007). Multichannel blind source separation using convolution Kernel compensation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 55(9), 4487–4496. <https://doi.org/10.1109/TSP.2007.896108>
- Kamen, G., & Knight, C. A. (2004). Training-Related Adaptations in Motor Unit Discharge Rate in Young and Older Adults. *The Journals of Gerontology: Series A*, 59(12), 1334–1338. <https://doi.org/10.1093/GERONA/59.12.1334>
- Moro, T., Brightwell, C. R., Deer, R. R., Graber, T. G., Galvan, E., Fry, C. S., Volpi, E., & Rasmussen, B. B. (2018). Muscle Protein Anabolic Resistance to Essential Amino Acids Does Not Occur in Healthy Older Adults Before or After Resistance Exercise Training. *The Journal of Nutrition*, 148(6), 900–909. <https://doi.org/10.1093/JN/NXY064>
- Orssatto, L. B. R., Rodrigues, P., Mackay, K., Blazeovich, A. J., Borg, D. N., de Souza, T. R., Sakugawa, R. L., Shield, A. J., & Trajano, G. S. (2023). Intrinsic motor neuron excitability is increased after resistance training in older adults. *Journal of Neurophysiology*, 129(3), 635–650. <https://doi.org/10.1152/jn.00462.2022>
- Patten, C., Kamen, G., & Rowland, D. M. (2001). Adaptations in maximal motor unit discharge rate to strength training in young and older adults. *Muscle & Nerve*, 24(4), 542–550. <https://doi.org/10.1002/MUS.1038>
- Pearcey, G. E. P., Alizedah, S., Power, K. E., & Button, D. C. (2021). Chronic resistance training: is it time to rethink the time course of neural contributions to strength gain? *European Journal of Applied Physiology*, 121(9), 2413–2422. <https://doi.org/10.1007/S00421-021-04730-4>
- Pucci, A. R., Griffin, L., & Cafarelli, E. (2006). Maximal motor unit firing rates during isometric resistance training in men. *Experimental Physiology*, 91(1), 171–178. <https://doi.org/10.1113/EXPPHYSIOL.2005.032094>
- Rich, C., & Cafarelli, E. (2000). Submaximal motor unit firing rates after 8 wk of isometric resistance training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(1), 190–196. <https://doi.org/10.1097/00005768-200001000-00028>

- Sakugawa, R. L., Moura, B. M., Orssatto, L. B. da R., Bezerra, E. de S., Cadore, E. L., & Diefenthaler, F. (2019). Effects of resistance training, detraining, and retraining on strength and functional capacity in elderly. *Aging Clinical and Experimental Research*, *31*(1), 31–39. <https://doi.org/10.1007/S40520-018-0970-5>
- Sale, D. G. (1988). Neural adaptation to resistance training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *20*(5 Suppl), S135–S145. <https://doi.org/10.1249/00005768-198810001-00009>
- Sterczala, A. J., Miller, J. D., Dimmick, H. L., Wray, M. E., Trevino, M. A., & Herda, T. J. (2020). 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. *European Journal of Applied Physiology*, *120*(1), 281–294. <https://doi.org/10.1007/S00421-019-04273-9/FIGURES/6>
- Van Cutsem, M., Duchateau, J., & Hainaut, K. (1998). Changes in single motor unit behaviour contribute to the increase in contraction speed after dynamic training in humans. *The Journal of Physiology*, *513* (Pt 1)(Pt 1), 295–305. <https://doi.org/10.1111/J.1469-7793.1998.295BY.X>
- Vila-Chã, C., Falla, D., & Farina, D. (2010). Motor unit behavior during submaximal contractions following six weeks of either endurance or strength training. *Journal of Applied Physiology*, *109*(5), 1455–1466. <https://doi.org/10.1152/JAPPLPHYSIOL.01213.2009/ASSET/IMAGES/LARGE/ZDG0111093150009.JPEG>
- Wilson, J. M., Thompson, C. K., McPherson, L. M., Zadikoff, C., Heckman, C. J., & MacKinnon, C. D. (2020). Motor Unit Discharge Variability Is Increased in Mild-To-Moderate Parkinson's Disease. *Frontiers in Neurology*, *11*. <https://doi.org/10.3389/fneur.2020.00477>

Ringraziamenti

Desidero ringraziare inanzitutto il professor Andrea Casolo, mio relatore di tesi, per la disponibilità mostrata durante tutto il percorso di tesi, oltrechè per la puntualità e l'accuratezza dei preziosi consigli forniti.

Ringrazio inoltre Alessandro Sampieri, mio correlatore, per la sua infinita pazienza e il prezioso e costante supporto fornito in ogni passo di questo studio.

Ringrazio i dottorandi, i tesisti e tutti coloro che hanno contribuito alla buona riuscita dello studio.

Desidero infine ringraziare di cuore la mia famiglia e Lupin per il supporto emotivo, economico e per l'aiuto nelle attività della vita quotidiana, senza i quali non sarebbe stato possibile realizzare questo percorso.