

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Scienze Biomediche

Corso di Laurea Triennale in Scienze Motorie

Tesi di Laurea

**PLASTICITÀ MUSCOLARE E ADATTAMENTI ARCHITETTONICI DEL MUSCOLO
VASTO LATERALE IN RISPOSTA A SEI SETTIMANE DI ALLENAMENTO DI FORZA
CON O SENZA SOVRACCARICO ECCENTRICO**

Relatore: Prof. Martino Franchi

Laureando: Lara Padovani

N° di matricola: 2047764

Anno Accademico 2023/2024

Ai malati invisibili.

INDICE

INTRODUZIONE	2
1. MUSCOLO SCHELETRICO E CONTRAZIONE	3
1.1 Muscolo vasto laterale	3
1.2 Plasticità muscolare.....	3
1.3 Proprietà del muscolo scheletrico	4
1.4 Tipi di contrazione e cambiamento morfologico del muscolo.....	4
1.5 Cambiamenti architetturici e geometrici del muscolo scheletrico in condizioni di sovraccarico	5
2. MATERIALI E METODI	7
2.1 Descrizione generale dello studio e struttura sperimentale.....	7
2.2 Screening.....	7
2.3 Test pre-intervento e Test post-intervento	8
2.3.1 Ecografia statica.....	8
2.3.2 Dinamometro – HDEMG e SWE.....	10
2.4 Intervento	11
2.5 Analisi delle immagini ecografiche	12
3. ANALISI STATISTICA	14
3.1 Descrizione dell'analisi statistica e confronto dei dati.....	14
3.1.1 Spessore muscolare	14
3.1.2 Lunghezza dei fascicoli muscolari	16
3.1.3 Angolo di pennazione	17
4. RISULTATI E CONCLUSIONI	19
4.1 MT.....	19
4.2 FL.....	20
4.3 PA.....	21
4.4 Considerazioni personali.....	22
BIBLIOGRAFIA	24

INTRODUZIONE

Il seguente progetto di tesi sperimentale vuole investigare gli adattamenti, i possibili cambiamenti architetturici, geometrici e di plasticità muscolare del muscolo vasto laterale del quadricipite femorale, in risposta ad uno stimolo meccanico conseguente ad un periodo di allenamento di forza convenzionale o con sovraccarico eccentrico, e come possa contribuire potenzialmente all'ipertrofia del muscolo in oggetto. Il progetto è stato realizzato nel laboratorio di Fisiologia del Dipartimento di Scienze Biomediche dell'Università degli Studi di Padova, sottoponendo i soggetti reclutati ad un protocollo di sei settimane di allenamento e utilizzando il macchinario Biostrength REV Leg Press (Technogym® S.p.A., Italy). Premesso che l'allenamento di forza con sovraccarico eccentrico contribuisca allo sviluppo della forza massima del muscolo scheletrico, l'obiettivo di questa tesi sperimentale è quello di capire quanto, questo tipo di allenamento di forza possa influenzare i cambiamenti delle caratteristiche strutturali del muscolo scheletrico causando, potenzialmente, ipertrofia e modificandone le modalità di trasduzione della forza. Lo scopo dello studio, inoltre, è quello di interpretare il possibile ruolo positivo dell'allenamento di forza con sovraccarico eccentrico, rispetto all'allenamento di forza convenzionale, e delle variazioni strutturali del muscolo scheletrico che ne derivano, specialmente relativi alla sport performance nella preparazione fisica d'élite e alla riabilitazione post infortunio. Grazie allo sviluppo delle tecniche non invasive di indagine, negli anni è stato possibile effettuare ricerche e sperimentazioni *in vivo*, piuttosto che su cadavere, in modo tale da ottenere dati d'analisi più realistici per quello che concerne lo studio del muscolo striato, delle sue caratteristiche d'architettura e dei suoi adattamenti. Quello che è stato effettuato, tramite sperimentazione *in vivo* con metodiche quali: ecografia statica ed elettromiografia ad alta intensità, e successivamente analizzato in questo progetto, rappresenta un possibile punto di svolta, sia nello studio dell'allenamento con sovraccarico durante la contrazione eccentrica, sia nella ricerca nell'ambito della fisiologia muscolare in generale, analizzando i comportamenti del tessuto muscolare scheletrico in condizioni specifiche e per un determinato periodo di tempo. Ci si domanda, inoltre, come e quanto i risultati ottenuti da questo studio possano contribuire al mondo della ricerca portando, eventualmente, spunti per le future investigazioni sul medesimo argomento.

1. MUSCOLO SCHELETRICO E CONTRAZIONE

1.1 Muscolo vasto laterale

Il muscolo vasto laterale è un muscolo scheletrico, che insieme al muscolo retto femorale, vasto mediale e vasto intermedio, compone il muscolo quadricipite femorale, quest'ultimo ha come funzione principale l'estensione della gamba sulla coscia ed è innervato dal nervo femorale (L2-L4). La sua origine si trova prossimalmente sulla superficie laterale del grande trocantere e dalla metà prossimale della linea aspra, del femore. Insieme al muscolo vasto mediale, decorre obliquamente rispetto all'asse longitudinale, avvolgendo il muscolo vasto intermedio, successivamente, attraversando il retinacolo laterale della rotula, raggiunge la sua inserzione distale, ovvero il condilo laterale della tibia. Nell'azione di estensione della gamba sulla coscia, i muscoli sinergici sono rappresentati dai tre muscoli che compongono il quadricipite femorale e dal tensore della fascia lata, mentre i muscoli antagonisti sono rappresentati dalla loggia degli ischio-crurali, dai muscoli gastrocnemio, gracile e sartorio.

1.2 Plasticità muscolare

Il muscolo, e di conseguenza la fibra muscolare, reagisce e si adatta a determinati stimoli meccanici e metabolici. I cambiamenti adattativi si creano nel momento in cui viene richiesto al muscolo un *task* da portare a termine, modificando le proprie caratteristiche di conformazione, il muscolo riuscirà a rispondere alla richiesta motoria nel modo più efficace ed efficiente possibile. Un esempio di adattamento del muscolo scheletrico è l'ipertrofia muscolare, che comporta un aumento della dimensione del muscolo, grazie all'accrescimento in diametro delle fibre. Precisamente, l'aumento della sintesi dei filamenti di actina e miosina andrà a contribuire all'ispessimento delle fibre muscolari stesse e agevererà il ciclo dei ponti trasversali che porteranno ad un'aumentata contrattilità muscolare. L'adattamento muscolare nell'ipertrofia si verifica durante l'allenamento di forza con sovraccarico, successivamente a cambiamenti molecolari interni, in risposta allo stimolo meccanico richiesto, per riuscire a contrastare il pacco pesi aggiunto alla forza di gravità esercitata sul corpo. A livello architetonico, il muscolo pennato, quale il vasto laterale, presenta caratteristiche che influenzano la curva forza-velocità e la relazione lunghezza-tensione, a causa del numero di

sarcomeri in serie e in parallelo all'interno della miofibrilla, oltre alla lunghezza del fascicolo muscolare e dal suo angolo di pennazione, prima e durante il picco della contrazione (*Narici, 1999*). Di conseguenza si può confermare che l'ipertrofia sia direttamente collegata all'aumento dell'angolo di pennazione della fibra muscolare, essendo, la pennazione, una modalità di assemblaggio di elementi contrattili. Più elementi contrattili si riusciranno a combinare sullo stesso tendine e maggiore sarà l'aumento dell'angolo di pennazione (*Kawakami et al., 1993-1995; Narici, 1999*). Di conseguenza, in questo studio, si vuole analizzare il cambiamento dell'angolo di pennazione e l'aumento della lunghezza del fascicolo, oltre alla *thickness* muscolare, conseguenti al protocollo di allenamento, per capire le modalità di adattamento del muscolo scheletrico in risposta alla richiesta meccanica indotta dall'allenamento, in questo caso analizzando contrazione concentrica ed eccentrica.

1.3 Proprietà del muscolo scheletrico

Una delle proprietà del muscolo scheletrico è la contrazione. L'agente principale della contrazione nel tessuto muscolare striato è il sarcomero, una porzione della miofibrilla compresa tra due linee Z adiacenti. Non trovandosi direttamente collegato al tessuto osseo, si avvale del tessuto connettivo e della componente tendinea per la propagazione della tensione, che porterà poi allo spostamento della componente ossea e all'effettuazione del movimento, grazie alla contrazione del tessuto muscolare striato. A livello fisiologico, l'eccitazione muscolare aziona la contrazione che, generando tensione, attiva il ciclo dei ponti trasversali e lo scorrimento dei filamenti i quali, a loro volta, accorciano i sarcomeri. Successivamente, con l'accorciamento del sarcomero, la componente del tessuto connettivo e la costituente tendinea si stirano, agendo come fattore elastico in serie della componente muscolare e assorbendo il trauma della tensione stessa (*Narici, 1999*), non essendo dotate di proprietà contrattile, trasferendo poi la tensione muscolare al tessuto osseo. A livello biomeccanico, il tessuto muscolare scheletrico, in base alle proprie inserzioni e alla sua azione contrattile, è in grado di effettuare diversi movimenti sui differenti piani di azione, per completare il *task* motorio richiesto.

1.4 Tipi di contrazione e cambiamento morfologico del muscolo

Esistono più tipi di contrazione, ognuna con caratteristiche diverse tra loro, le principali sono la contrazione isotonica e la contrazione isometrica. In questa tesi ci si occuperà di analizzare le

sottovarianti della contrazione isotonica, ovvero la contrazione concentrica e la contrazione eccentrica, e quello che a livello di architettura e plasticità muscolare può succedere in conseguenza ad un determinato tipo di protocollo di allenamento. Il termine “isotonico” è un aggettivo composto, derivante dalla lingua greca (“ἴσος”, uguale e “τονικός”, tensione/tono), che si riconduce facilmente alla caratteristica principale della contrazione isotonica, ovvero la tensione muscolare costante abbinata alla variazione di lunghezza del muscolo scheletrico. Nell’isotonia si possono analizzare la contrazione concentrica e la contrazione eccentrica, simili tra loro perché ambedue presentano cambiamento di lunghezza del muscolo a tensione costante, ma che differiscono tra loro per il tipo di comportamento delle fibre nel cambiamento di lunghezza. Infatti, nella contrazione concentrica il muscolo si accorcia, mentre nella contrazione eccentrica il muscolo si allunga. La contrazione eccentrica in realtà è familiare, infatti, combinata alla contrazione concentrica, rende possibile svolgere i compiti motori richiesti dalla quotidianità. Infatti, è responsabile della dissipazione meccanica dell’energia durante la decelerazione corporea e della conversione dell’energia cinetica in energia elastica nei tendini, riacquisita poi durante il movimento di supporto e stabilità del corpo. (M. V. Franchi, 2017). Le modalità di espressione e dissipazione di energia, agenti durante la contrazione eccentrica, sono utili affinché i *task* motori vengano effettuati al minor costo metabolico possibile. Questo è un tassello importante dello studio, in chiave di allenamento e preparazione fisica, in quanto la contrazione eccentrica può essere utilizzata attraverso metodiche di allenamento specifiche, per raggiungere risultati di *sport performance* non indifferenti (Hoppeler, 2016). Nel campo della prevenzione e della riabilitazione, tale contrazione riveste la medesima importanza, in quanto le strategie che il tessuto muscolare utilizza per adattarsi a determinati stimoli meccanici imposti dall’ambiente esterno, se cambiati (in questo caso a causa della contrazione eccentrica), possono influenzare quelle che sono le normali modalità di relazione forza-lunghezza e forza-velocità ottimali del muscolo scheletrico.

1.5 Cambiamenti architettonici e geometrici del muscolo scheletrico in condizioni di sovraccarico

Attraverso la tecnica ecografica utilizzata in questo studio, sarà possibile confrontare il muscolo e tutte le sue caratteristiche geometriche prima e dopo il protocollo di allenamento, quindi sarà fattibile studiare ed analizzare quali siano gli adattamenti muscolari messi in atto, a livello di rimodellamento, di plasticità muscolare e architettura, sia nel protocollo di allenamento

convenzionale, sia nel protocollo di allenamento con sovraccarico eccentrico, che nell'esecuzione dell'esercizio prevede la combinazione di contrazione concentrica e contrazione eccentrica. È stato studiato che l'allenamento con sovraccarico, sia convenzionale che eccentrico, porti a molteplici adattamenti a livello strutturale, ma è certo anche che lo stimolo proposto e indotto dall'allenamento di forza nei due casi, abbia come conseguenza risposte miogeniche e molecolari differenti (Reeves et al., 2009). L'allenamento di forza con sovraccarico eccentrico porta ad un aumento di lunghezza dei fascicoli (Franchi et al., 2014), questo avviene a causa dell'aumento di forza massima prodotta a lunghezze maggiori del muscolo (Timmins et al., 2016 a-b) e, molto probabilmente, anche a causa del danno prodotto a livello muscolare, che agisce come meccanismo difensivo e di protezione da parte del tessuto stesso (Morgan and Talbot, 2002), senza però presentare un cambiamento notevole dell'angolo di pennazione del fascicolo rispetto alla sua aponeurosi. Contrariamente, nell'allenamento di forza convenzionale si verifica un aumento dell'angolo di pennazione senza un notevole aumento della lunghezza del fascicolo (Franchi et al., 2014). La motivazione di questo diverso comportamento del muscolo è rappresentata dal fatto che, l'allenamento con sovraccarico eccentrico contribuisce ad un incremento, in numero, dei sarcomeri in serie, mentre l'allenamento convenzionale contribuisce ad un incremento, in numero, dei sarcomeri in parallelo, e anche per questo motivo la modalità di distribuzione ipertrofica sarà differente in riferimento ai due tipi di contrazione (Reeves et al., 2009; Franchi et al., 2014). È presente ipertrofia dalla parte centrale del ventre muscolare verso l'inserzione distale per il convenzionale, mentre per l'eccentrico è presente ipertrofia nella parte centrale del ventre muscolare (Franchi et al., 2014). Per quanto riguarda la *thickness* muscolare, non ci sono evidenti differenze tra allenamento di forza convenzionale e con sovraccarico eccentrico, se eseguiti nel protocollo di allenamento combinato convenzionale-eccentrico, contrariamente a quanto avviene invece nel protocollo di allenamento con contrazione solamente concentrica o solamente eccentrica (Franchi et al., 2017). È interessante e utile studiare gli adattamenti morfologici del muscolo perché a livello strutturale non sono ancora chiare e certe le modalità che caratterizzano i comportamenti di cambiamento attuate dal tessuto muscolare in queste determinate condizioni di allenamento di forza. A livello teorico, la plasticità muscolare permette al corpo un adattamento tale da riuscire a mantenere la condizione fisica in relazione allo stimolo proposto, comportamento intrinseco del tessuto che cerca, a livello architettonico, un adeguamento e una trasformazione per rispondere alla richiesta meccanica esterna. Tutto ciò ha un'importante relazione con la funzione del muscolo stesso, dato che l'adattamento può portare ad un cambiamento strutturale del muscolo, con possibili mutamenti neurali e di trasduzione.

2. MATERIALI E METODI

2.1 Descrizione generale dello studio e struttura sperimentale

Lo studio è stato realizzato nel laboratorio di Fisiologia del Dipartimento di Scienze Biomediche dell'Università degli Studi di Padova, da un'équipe di ricercatori e studenti nel corso dell'Anno Accademico 2023/2024. Il protocollo prevedeva sei settimane di allenamento, ogni settimana i soggetti dovevano effettuare tre allenamenti, a coloro che sono stati selezionati, tramite un sondaggio, venivano richieste informazioni e caratteristiche sullo stile di vita e sul livello di attività fisica quotidiana praticata. Nello specifico: nome, cognome, età, sesso, peso, altezza, che tipo e quanta attività fisica svolgessero settimanalmente, patologie croniche o patologie e fisiopatologie degne di nota, trattamenti farmacologici ed infortuni nei precedenti ventiquattro mesi. Questo perché alcune informazioni potevano risultare discriminanti per partecipazione allo progetto, per esempio se il soggetto si allenasse più di tre volte a settimana, oppure se soffriva di patologie metaboliche, come anche se avesse avuto un infortunio recentemente. Infatti, tutti e sedici i soggetti reclutati, otto di sesso maschile e otto di sesso femminile, dovevano essere *recreationally active*, ovvero svolgere attività fisica in modo ricreativo, senza un ampio volume di allenamento settimanale. Il motivo per il quale i soggetti selezionati dovessero essere attivi ricreativamente, piuttosto che atleti già formati, è dato dal fatto che i possibili adattamenti muscolari sarebbero stati più evidenti in coloro che non svolgessero attività fisica quotidiana con un dispendio energetico e muscolare di importanza rilevante, sia per quanto riguarda l'architettura del tessuto muscolare scheletrico, sia per quanto riguarda il reclutamento delle unità motorie nella contrazione volontaria. I soggetti sono stati sottoposti a dei test prima e dopo il periodo di allenamento di forza, per confermare o meno l'ipotesi fondamento dello studio. Non sono state rilevate particolari criticità che impedissero l'attuazione dello studio, che è stato così ideato e realizzato: Screening, Test pre-intervento, Intervento, Test post-intervento, Analisi delle immagini ecografiche.

2.2 Screening

I soggetti selezionati avevano un'età compresa tra i 18 e i 35 anni, attivi a livello ricreativo, tutti appartenenti al bacino di allievi dell'Università degli Studi di Padova, reclutati grazie anche alla pubblicizzazione dello studio tramite un codice QR. I soggetti interessati hanno compilato un *form* dove venivano richieste alcune informazioni personali, criteri di inclusione ed esclusione, poi sono

stati selezionati da parte dell'équipe dello studio. Successivamente sono stati collocati, equamente per genere, in base alle caratteristiche anatomiche e al passato sportivo, ad un determinato gruppo: *Gruppo di controllo*, protocollo di allenamento convenzionale o *Gruppo di lavoro*, protocollo di allenamento con sovraccarico eccentrico. La divisione dei soggetti reclutati determinava anche l'attribuzione di una sigla, composta dall'abbreviazione del gruppo di appartenenza e dall'anno di effettuazione dello studio. I partecipanti al gruppo di controllo erano caratterizzati dalla sigla CONV24, mentre i partecipanti al gruppo di lavoro erano caratterizzati dalla sigla ECC24. Per distinguerli, ai soggetti è stato assegnato un codice da aggiungere dopo la sigla del gruppo nel quale si trovavano, in ordine crescente da 01 a 08. Sinteticamente, i soggetti appartenenti al gruppo di controllo erano identificati da CONV2401 a CONV2408, mentre i soggetti appartenenti al gruppo di lavoro erano identificati da ECC2401 a ECC2408.

2.3 Test pre-intervento e Test post-intervento

Il giorno dei test pre-intervento i soggetti reclutati sono stati informati e istruiti su tutte le modalità di effettuazione dello studio. Ai partecipanti è stato consegnato il foglio informativo, dotato di rationale dello studio, descrizione dell'intervento, gestione dati e *privacy* e successivamente è stato fatto firmare il consenso informato. È stato somministrato il GPAQ, *Global Physical Activity Questionnaire*, un questionario avente lo scopo di valutare il livello di attività fisica e sedentarietà dei soggetti. È stato consegnato un diario alimentare da compilare prima e dopo l'intervento, nel quale trascrivere gli alimenti consumati, le quantità, l'ora e il luogo di consumo del pasto, per capire se le abitudini alimentari, a livello di introito calorico, cambiassero dopo il periodo di allenamento di sei settimane. Tutti i test pre-intervento e la burocrazia (Consenso informato, GPAQ e Diario alimentare), sono stati ripetuti e riconsegnati dopo il periodo di sei settimane, esattamente con le stesse modalità.

2.3.1 Ecografia statica

L'ecografia ad ultrasuoni è una metodica utilizzata in ambito clinico e sportivo per riuscire ad ottenere immagini di qualità del tessuto muscolare e delle componenti tendinee e strutturali del plesso in oggetto. Da anni è utilizzata perché indolore ed è considerata una metodica non invasiva per il soggetto. Il funzionamento dell'ecografia ad ultrasuoni è possibile grazie ad un *probe*, una sonda che appoggiata sul plesso da analizzare permette, con l'ausilio di un gel apposito che ottimizza la

diffusione delle onde sonore con frequenza ultrasonica, di avere un'immagine nitida e ottimale del muscolo. Quando viene appoggiata sul corpo del soggetto, la sonda funge da trasduttore emettendo delle onde sonore che attraversano i tessuti, i quali riflettono in diversa misura le onde, che vengono rilevate nuovamente dalla sonda e recepite dal macchinario che le converte in immagini bidimensionali. Per migliorare la qualità dell'immagine, ci si avvale del macchinario, potendo modificare *depth*, *brightness* e *frequency* della rilevazione, in base alle esigenze, utilizzando due ecografi differenti, per un totale di quattro sonde ecografiche. Per eseguire l'ecografia, ogni soggetto è stato invitato a stendersi supino su un lettino medico, e con un pennarello lavabile sono stati segnati sul suo arto inferiore destro i punti di repere necessari per le misurazioni ecografiche:

- Grande trocantere del femore;
- Punto medio patellare;
- 50% della lunghezza del femore;
- 40% della lunghezza del femore;
- 35% della lunghezza del femore;
- 30% della lunghezza del femore;
- 20% della lunghezza del femore;
- 60% della lunghezza del femore;
- 70% della lunghezza del femore.



Figura 1 - Ecografia con sonda posizionata al 30% della lunghezza del femore

Il grande trocantere ed il punto medio patellare sono stati individuati per misurare la lunghezza dell'osso femorale, e per individuare le varie porzioni della sua lunghezza (20%, 30%, 35%, 40%, 50%, 60% e 70% della lunghezza del femore). Per identificare le misurazioni segnate con il pennarello, è stato attribuito al grande trocantere il 100%, mentre al punto medio patellare lo 0% della lunghezza totale del femore. Queste misurazioni avevano lo scopo di determinare i punti di partenza per eseguire le ecografie. La prima rilevazione ecografica è stata effettuata con il macchinario Supersonic Imagine Aixplorer®, utilizzando una sonda da 5 cm (SL 18-5), posizionata in modo longitudinale rispetto alle fibre muscolari del vasto laterale, eseguendo uno *snap shot*, quindi fondamentalmente una fotografia, al 50% e al 30% della lunghezza del femore.



Figura 2 - *Snap shot* 50% del muscolo vasto laterale, eseguito con tecnica ecografica ad ultrasuoni

Per la seconda rilevazione ecografica è stata eseguita una panoramica del muscolo vasto laterale, partendo dal 50% e dal 30% della lunghezza del femore. La terza rilevazione ecografica è stata effettuata utilizzando una sonda da 3,8 cm (SL 10-2) e attraverso una panoramica è stato possibile ottenere una *cross sectional area* (CSA), del muscolo vasto laterale dal 20% al 70% della lunghezza del femore. La quarta rilevazione ecografica è stata effettuata con il macchinario Esaote® Mylab 70 Xvision, utilizzando una sonda da 10 cm (LA923), posizionata in modo longitudinale rispetto alle fibre muscolari del vasto laterale, eseguendo uno *snap shot* al 50% della lunghezza del femore. La quinta rilevazione ecografica è stata effettuata utilizzando una sonda da 4,7 cm (LA523) e attraverso una panoramica è stato possibile ottenere una *cross sectional area* (CSA) del vasto laterale dal 20% al 70% della lunghezza del femore. Le rilevazioni ecografiche precedentemente descritte avevano lo scopo finale di valutare, in successiva analisi, la *muscle thickness*, la lunghezza dei fascicoli muscolari e il loro angolo di pennazione rispetto alla loro stessa aponeurosi. Le componenti e le caratteristiche precedentemente elencate sono risultate fondamentali per definire il ruolo dell'adattamento del tessuto muscolare scheletrico all'allenamento con sovraccarico eccentrico, come già confermato in letteratura.

2.3.2 Dinamometro – HDEMG e SWE

In un secondo momento, ogni soggetto è stato invitato a sedersi sul dinamometro ed è stato sottoposto ad un test per misurare la forza massima isometrica dell'arto inferiore destro (MVC,

maximum voluntary contraction) e ad un test effettuato attraverso elettromiografia superficiale ad alta intensità (HDEMG, *high density electromyography*), tecnica non invasiva che permette di valutare le unità motorie reclutate durante le contrazioni sub-massimali eseguite dal soggetto. Tutto ciò precedentemente descritto, grazie all'ausilio di una schiera di elettrodi posti in corrispondenza del muscolo vasto laterale, per misurare e quantificarne l'attività elettrica. Con il macchinario Supersonic Imagine Aixplorer®, è stata eseguita un'elastografia, *Shear Way Elastography* (SWE) con l'utilizzo di una sonda da 3,8 cm (SL 10-2), con range di modulo elastico pari a 300 KPa, con la quale veniva acquisito un video di cinque secondi che stimava la *stiffness* del muscolo, quindi il grado di elasticità del tessuto. La SWE misura la *shear way velocity*, la velocità con la quale le onde sonore, dalla sonda ecografica, ritornano alla sonda stessa, delineando una mappa di rigidità del muscolo in oggetto. Questa parte del progetto non verrà descritta all'interno del presente elaborato di tesi.

2.4 Intervento

Per il progetto è stata utilizzata la Leg Press REV Biostrenght (Technogym® S.p.A., Italy), appartenente a una linea di macchinari dotati di motore elettromagnetico, che rende possibile più tipi di allenamenti con sovraccarico, tra i quali l'allenamento con sovraccarico eccentrico, permettendo un *load*, quindi un carico, maggiore durante la fase eccentrica, pari a 1,5 volte il carico della fase concentrica, modalità utilizzata per questo studio.



Figura 3 – Biostrenght REV Leg Press, Technogym® S.p.A., Italy

Il protocollo prevedeva tre allenamenti settimanali, da distribuire nell'arco di cinque giorni, prestando attenzione alle ventiquattro ore di recupero tra un allenamento e l'altro, per una durata di sei settimane. È stata effettuata una seduta di familiarizzazione del macchinario per ogni soggetto, nella quale sono stati eseguiti dei test per calcolare il carico da applicare per gli allenamenti, grazie alla stima del personale 1RM. Ad ogni seduta veniva calcolato il ROM, *range of movement*, del soggetto sul macchinario. Il protocollo prevedeva riscaldamento e allenamento sulla Leg Press eseguita in monopodalico per entrambi gli arti inferiori, il riscaldamento era formato da una serie da dieci ripetizioni, pari al 30% dell'1RM stimato e una serie da cinque ripetizioni pari al 50% dell'1RM stimato, l'allenamento consisteva in quattro serie pari al 70% dell'1RM stimato, per le prime quattro settimane, e da cinque serie pari al 70% dell'1RM stimato per le ultime due settimane. Il gruppo convenzionale doveva eseguire dieci ripetizioni per ogni serie, mentre il gruppo con sovraccarico eccentrico doveva eseguire otto ripetizioni per ogni serie. Il *Time Under Tension*, TUT, il tempo nel quale il muscolo si ritrova in tensione, era di due secondi sia per la fase concentrica, sia per la fase eccentrica del movimento, per tutti e due i gruppi. I soggetti sono stati sottoposti a dei test, come il test isocinetico (forza dinamica), e alla fine di ogni settimana è stato ricalcolato il personale 1RM per ricalibrare i carichi. Per monitorare i soggetti, sono state utilizzate la Scala *Soreness*, che stima il dolore muscolare percepito, e la Scala RPE di Borg, che stima l'affaticamento generale percepito. Questa parte del progetto non verrà descritta all'interno del presente elaborato di tesi.

2.5 Analisi delle immagini ecografiche

Per questa tesi sperimentale, verranno analizzati gli *snap shot* ecografici al 50% effettuati con l'ecografo ad ultrasuoni Supersonic Imagine Aixplorer®. Più precisamente, saranno oggetto di analisi le seguenti componenti e caratteristiche strutturali: spessore muscolare, lunghezza dei fascicoli e angolo di pennazione rispetto all'aponeurosi. L'analisi ecografica è stata realizzata grazie alla versione *Fiji* del software *ImageJ*, che ha permesso di disegnare le diverse componenti, per avere una chiara rappresentazione della porzione in esame. Per ogni immagine analizzata è stata settata una scala a 5 cm, per la determinazione delle misurazioni, e una grandezza canvas specifica. Dallo *snap shot* si possono evidenziare le due aponeurosi, superficiale e profonda, che delimitano la *muscle thickness*, ovvero lo spessore del muscolo (prossimale, centrale e distale), disegnato e calcolato tracciando delle linee perpendicolari rispetto alle due aponeurosi. Per misurare la lunghezza dei fascicoli (uno prossimale, uno centrale e uno distale), invece, è stato necessario disegnare

un'estrapolazione delle due aponeurosi, così che fosse possibile delineare correttamente il fascicolo. Partendo dall'aponeurosi profonda è stato possibile, grazie al tool "segmented line" di *ImageJ*, disegnare il fascicolo seguendo precisamente la sua forma, a volte caratterizzata da curvature, arrivando all'aponeurosi superficiale per chiudere il fascicolo. Dopodiché è stato possibile determinare, e di conseguenza calcolare in gradi, l'angolo di pennazione dei fascicoli (prossimale, centrale e distale), prendendo come riferimenti il fascicolo e l'aponeurosi profonda.

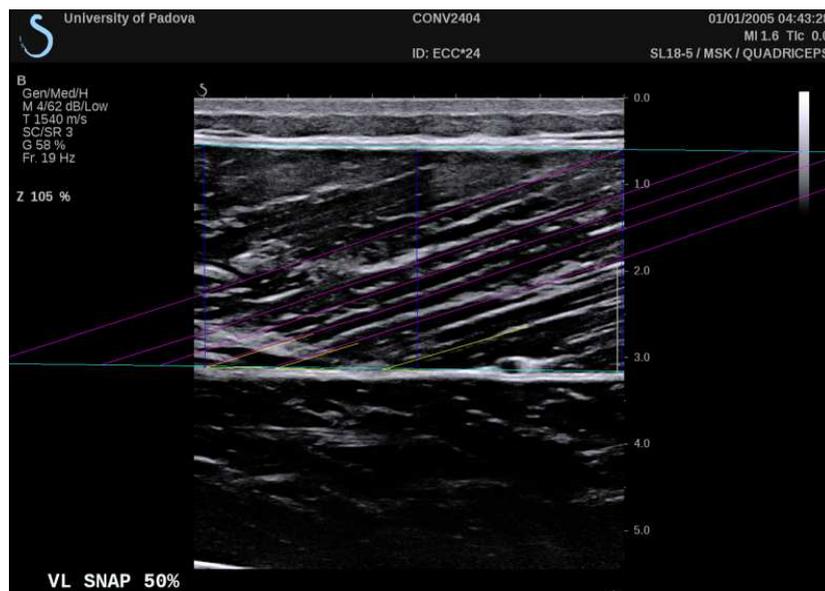


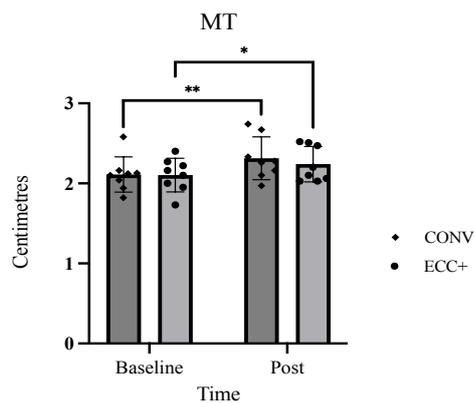
Figura 4 - Snap shot 50% del muscolo vasto laterale, con DA, SA, MT, FL e PA

3. ANALISI STATISTICA

3.1 Descrizione dell'analisi statistica e confronto dei dati

In seguito, è risultato necessario elaborare i dati raccolti durante l'analisi delle immagini attraverso un'indagine statistica. Questo per determinare se, l'ipotesi di tesi postulata in principio fosse concorde con gli studi scientifici precedentemente esaminati, quindi a conferma della letteratura fino ad oggi esaminata, oppure se i dati forniti da questo studio risultassero innovativi. In questa fase dello studio, sono stati analizzati i dati relativi ai parametri di architettura muscolare del muscolo vasto laterale, descritti nel capitolo 2, ottenuti grazie all'analisi delle immagini ecografiche *snap shot* 50%. Questi dati sono stati trascritti su un foglio di lavoro del programma *Excel*, successivamente sono state calcolate media aritmetica e deviazione standard dei parametri oggetto di studio. Per il confronto dei dati è stato utilizzato il programma *GraphPad Prism*, che sintetizza i risultati ottenuti dall'analisi delle immagini, per mezzo di grafici descrittivi. Per il calcolo della significatività statistica, ci si è avvalsi dei test statistici *2way ANOVA* e *Unpaired T-Test*. Il *p-value*, valore p, ovvero l'indicatore di probabilità che determina il criterio di significatività statistica, è stato posto a 0,05, i risultati ottenuti al di sopra di questo valore, non sono considerati significativi, quindi essendo irrilevanti non saranno analizzati in questo elaborato di tesi.

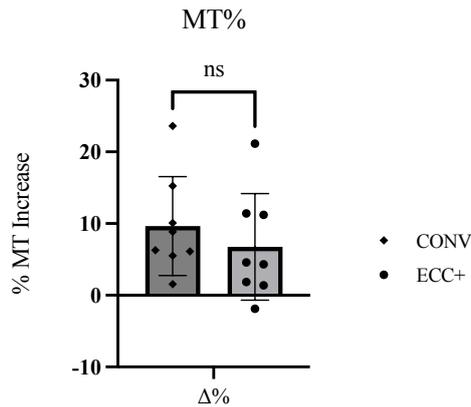
3.1.1 Spessore muscolare



MT	Pre (cm)	Post (cm)	P-value	Incremento %
CONV	2,11	2,31	0,0024	9,66
ECC+	2,10	2,24	0,0328	6,75

Dai dati ottenuti analizzando lo spessore muscolare, si può confermare che i due gruppi presentano un adattamento ipertrofico dato dall'aumento dello spessore muscolare, come

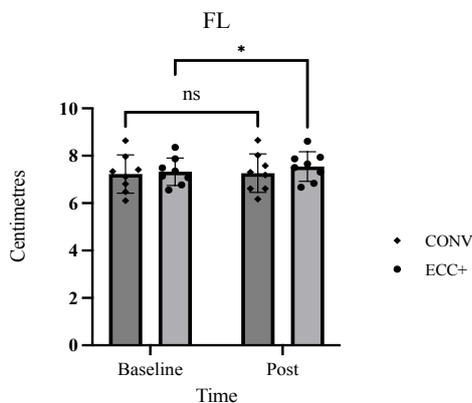
conseguenza alle sei settimane di allenamento di forza. Questi dati sono risultati significativi a livello statistico per tutti e due i gruppi. Nel gruppo convenzionale l'aumento, in centimetri, è maggiore rispetto al gruppo con sovraccarico eccentrico. Nel confronto tra gruppi Conv ed Ecc+ pre-intervento e nel confronto tra gruppi Conv ed Ecc+ post-intervento, per quanto riguarda lo spessore muscolare, non è stata riscontrata significatività statistica (P-baseline = 0,9974, > 0,05 / P-post = 0,7776, > 0,05).



Gruppo	MT pre \pm dev.st (cm)	MT post \pm dev.st (cm)	VAR \pm dev.st (%)
CONV	2,11 \pm 0,22	2,31 \pm 0,27	9,66 \pm 6,91
ECC+	2,10 \pm 0,21	2,24 \pm 0,22	6,75 \pm 7,44

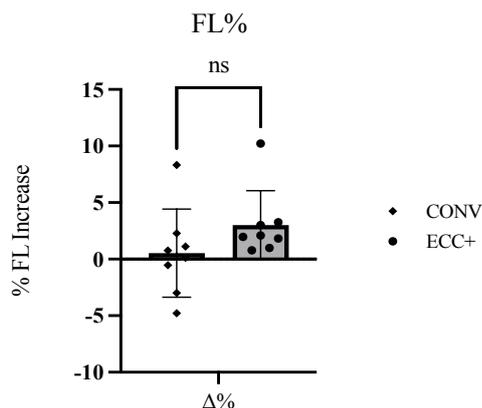
È stato calcolato l'incremento percentuale dello spessore muscolare dopo il protocollo di allenamento di forza per tutti e due i gruppi di lavoro, non raggiungendo però la significatività statistica (P-value = 0,1460). È stato, inoltre, calcolato il cambiamento percentuale inerente alle caratteristiche oggetto di studio tra il gruppo convenzionale e il gruppo con sovraccarico eccentrico, ma questo confronto tra i due gruppi non ha raggiunto la significatività statistica (P-value = 0,5185).

3.1.2 Lunghezza dei fascicoli muscolari



FL	Pre (cm)	Post (cm)	P-value	Incremento %
CONV	7,23	7,27	0,8949 (ns)	0,54 (ns)
ECC+	7,33	7,55	0,0323	3,02

Dai dati ottenuti analizzando la lunghezza dei fascicoli, si può confermare che l'aumento della lunghezza, in centimetri, dei fascicoli nel confronto tra *baseline* e post-intervento nel gruppo con sovraccarico eccentrico sia risultato statisticamente rilevante, al contrario, gli stessi dati nel gruppo convenzionale non sono risultati statisticamente rilevanti. Nel confronto tra gruppi Conv ed Ecc+ pre-intervento e nel confronto tra gruppi Conv ed Ecc+ post-intervento non c'è significatività statistica (P-baseline = 0,9581, > 0,05 / P-post = 0,6826, > 0,05).

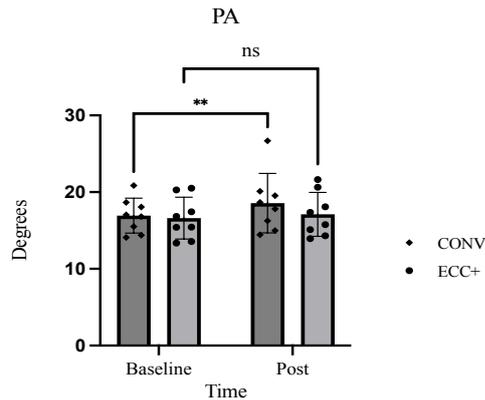


Group	FL pre ± dev.st (cm)	FL post ± dev.st (cm)	VAR ± dev.st (%)
CONV	7,23 ± 0,81	7,27 ± 0,82	0,54 ± 3,90
ECC+	7,33 ± 0,58	7,55 ± 0,62	3,02 ± 3,03

È stato calcolato l'incremento percentuale della lunghezza dei fascicoli muscolari dopo il protocollo di allenamento di forza per tutti e due i gruppi di lavoro, non raggiungendo però la significatività

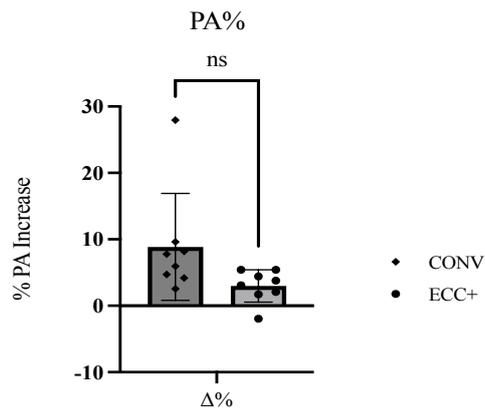
statistica. È stato, inoltre, calcolato il cambiamento percentuale inerente allo spessore muscolare tra il gruppo convenzionale e il gruppo con sovraccarico eccentrico, ma questo confronto tra i due gruppi non ha raggiunto la significatività statistica.

3.1.3 Angolo di pennazione



PA	Pre (degrees)	Post (degrees)	P-value	Incremento %
CONV	16,93	18,57	0,0054	8,86
ECC+	16,61	17,10	0,4916 (ns)	3 (ns)

Dai dati ottenuti analizzando l'angolo di pennazione, si può confermare che il gruppo con sovraccarico eccentrico non presenti un aumento statistico significativo, al contrario del gruppo convenzionale per quanto riguarda l'angolo di pennazione. Come da letteratura scientifica, nel gruppo convenzionale si manifesta un incremento nell'angolo di pennazione rispetto al gruppo con sovraccarico eccentrico, che non presenta questa caratteristica a livelli statisticamente rilevanti. Nel confronto tra gruppi Conv ed Ecc+ pre-intervento e nel confronto tra gruppi Conv ed Ecc+ post-intervento non c'è significatività statistica ($P\text{-baseline} = 0,9712 > 0,05$ / $P\text{-post} = 0,5610 > 0,05$).



Group	PA pre \pm dev.st (deg)	PA post \pm dev.st (deg)	VAR \pm dev.st (%)
CONV	16,93 \pm 2,28	18,57 \pm 3,87	8,86 \pm 8,06
ECC+	16,61 \pm 2,73	17,10 \pm 2,87	3,00 \pm 2,43

È stato calcolato l'incremento percentuale dell'angolo di pennazione dopo il protocollo di allenamento di forza per tutti e due i gruppi di lavoro, non raggiungendo la significatività statistica. È stato, inoltre, calcolato e relazionato tra i due gruppi il cambiamento percentuale inerente all'angolo di pennazione, esso non ha raggiunto la significatività statistica, ma ha dimostrato comunque una forte tendenza significativa (P-value = 0,0687).

4. RISULTATI E CONCLUSIONI

4.1 MT

Per quanto concerne la *muscle thickness*, i dati risultati significativi a livello statistico riguardano l'aumento, in centimetri, post-intervento della dimensione della porzione muscolare in tutti e due i gruppi. Nel gruppo convenzionale troviamo un incremento percentuale del 9,66% (P-value = 0,0024), mentre nel gruppo con sovraccarico eccentrico troviamo un incremento percentuale del 6,75% (P-value = 0,0328). Da letteratura ci si aspettava di constatare una maggiore ipertrofia nel gruppo con sovraccarico eccentrico, questo perché, di per sé, lo stimolo meccanico somministrato nella contrazione eccentrica è maggiore ed è comunque noto il fatto che la contrazione eccentrica sviluppi maggiore ipertrofia e forza rispetto alla contrazione concentrica (nel caso pure concentric vs pure eccentric). Dall'incremento percentuale si nota come il gruppo convenzionale presenti una tendenza a sviluppare maggiore ipertrofia rispetto al gruppo con sovraccarico eccentrico, diversamente da quanto ci si sarebbe aspettato. Questo può essere spiegato dal fatto che l'intensità dello stimolo meccanico proposto potrebbe non essere la sola caratteristica fondamentale per lo sviluppo dell'ipertrofia muscolare e soprattutto perché è probabile che la contrazione a lunghezze maggiori, sia responsabile di danni causati agli elementi contrattili, connettivali e citoscheltrici del muscolo (Brughelli e Cronin, 2007), e quindi produca una lesione muscolare tale da non permettere uno sviluppo ipertrofico sostanziale nelle sei settimane di allenamento proposto dal protocollo. Il danno muscolare indotto dall'allungamento delle miofibrille, durante la contrazione eccentrica, attiva enzimi lisosomiali da parte dei neutrofili e delle piastrine, comportando la perdita d'integrità cellulare a causa della rottura del citoscheletro (Nosaka et al., 2002), con conseguenze come il deposito intracellulare di fibronectina plasmatica, riduzione della capacità ossidativa della fibra muscolare, disallineamento delle bande A ed I con irregolarità del disco Z, sito principale di danno in risposta alla contrazione in allungamento, e slittamento dei filamenti spessi dai reticoli dei filamenti sottili. Tutto ciò causa disorganizzazione e squilibrio meccanico tra sarcomeri adiacenti, a causa del danneggiamento delle molecole di titina e accumulo di cellule fagocitiche (Friden e Lieber, 1998). Inoltre, il *repeated bout effect*, fenomeno per il quale un non abituale esercizio eccentrico induce danno al muscolo scheletrico ma conferisce anche un adattamento protettivo futuro al danno indotto dallo stesso tipo di esercizio, è probabilmente il meccanismo principale che il muscolo adotta in seguito all'allenamento eccentrico. Il danno muscolare indotto dall'esercizio eccentrico non può

essere completamente evitato quando l'intervallo tra i *bouts* è minore di quattro settimane (Nosaka, 2005), teoria che dimostrerebbe il motivo per il quale sia stata riscontrata minore ipertrofia nel gruppo con sovraccarico eccentrico, probabilmente provocata dalla lesione muscolare prodotta durante le prime due settimane di allenamento. Quindi, a livello teorico, dopo sei settimane di allenamento, il soggetto sta ancora recuperando dal danno muscolare. Oltre alla sarcomero genesi, le fibre danneggiate possiedono la capacità di incorporare sarcomeri in serie aggiuntivi, modificandone anche la curva forza-lunghezza per evitare instabilità strutturale del sarcomero associata a quella zona della curva (Morgan e Talbot, 2002), e diventando più resilienti, riuscendo a resistere lo stesso tipo di contrazione eccentrica dopo che le fibre suscettibili allo stress vengono rimosse e sostituite da fibre rigenerate, grazie al processo di degenerazione/rigenerazione (Nosaka et al., 2005). Infatti, la relazione forza-lunghezza e la relazione forza-velocità dipendono ambedue dall'arrangiamento spaziale delle fibre muscolari del muscolo scheletrico. In sostanza, sarà più probabile riscontrare una maggiore ipertrofia, per esempio dopo otto settimane, invece che sei, ma questa rimane una speculazione. In ogni caso, lo spessore muscolare aumenta in tutti e due i gruppi, come già dimostrato dalla letteratura scientifica (Hoppeler, 2016).

4.2 FL

Per quanto concerne la lunghezza dei fascicoli muscolari, i dati risultati significativi a livello statistico riguardano l'aumento, in centimetri, dei fascicoli relativi ai soggetti del gruppo con sovraccarico eccentrico, con un incremento percentuale del 3,02% (P-value = 0,0323). Anche il gruppo convenzionale presenta un aumento, in centimetri, della lunghezza dei propri fascicoli muscolari, ma non in modo statisticamente significativo. Questo dato concorda con la letteratura scientifica, infatti è già stato dimostrato che l'esercizio eccentrico (che sia puro eccentrico o concentrico con sovraccarico eccentrico) comporti un aumento in lunghezza dei fascicoli muscolari (Franchi et al., 2014). Gli adattamenti della lunghezza dei fascicoli possono non essere influenzati solamente dalla modalità di contrazione stessa, ma anche dal *range of motion* del movimento durante l'allenamento (Blazevich et al., 2007). Il ROM, *range of motion*, raggio di escursione muscolare, e quindi il grado di allungamento imposto, è una delle cause di adattamento in lunghezza dei fascicoli muscolari, sia per quanto riguarda la contrazione concentrica, sia per quella eccentrica, ma essendo la contrazione eccentrica un tipo di contrazione in allungamento che porta uno stimolo di allungamento maggiore durante il movimento, si verificherà inevitabilmente un adattamento con aumento di lunghezza dei

fascicoli muscolari (Franchi et al., 2014). Principio spiegato dall'aumento di forza massima prodotta a lunghezze maggiori del muscolo (Timmins et al., 2016 a-b). È stato dimostrato che anche dopo un solo bout di esercizio eccentrico, la curva che rappresenta la relazione forza-lunghezza, cambi il riferimento ottimale di lunghezza (*optimum length*) nel quale viene sviluppata la massima tensione, spostandosi verso lunghezze muscolari maggiori. Questo perché le fibre danneggiate, aggiungendo sarcomeri in serie, causano una modifica della curva della relazione forza-lunghezza del muscolo verso lunghezze maggiori, così facendo si potrà sopperire all'instabilità del sarcomero associata a quella zona della curva, responsabile del danno che si crea successivamente alla contrazione eccentrica (Brughelli e Cronin, 2007). L'alterazione della curva forza-tensione, data dall'esercizio eccentrico, a causa dell'aggiunta di sarcomeri in serie, modifica anche il numero di ponti trasversali actomiosinici, che porteranno come principale conseguenza una produzione di forza maggiore se il muscolo è attivato mentre si allunga. Questo concetto è importante perché dimostra che la funzionalità muscolare e la sua stessa stabilità possono essere mantenute a lunghezze maggiori.

4.3 PA

Per quanto concerne l'angolo di pennazione dei fascicoli muscolari, tutti e due i gruppi presentano un incremento percentuale post-intervento, ma i dati significativi a livello statistico riguardano solamente il gruppo convenzionale. L'angolo di pennazione è direttamente relazionato allo spessore muscolare, maggiore sarà lo spessore muscolare e maggiore sarà l'angolo di pennazione del muscolo in oggetto. (Blazevich et al., 2007). A dimostrare questa teoria di relazione costante, i dati statistici raccolti da questo studio: il gruppo convenzionale presenta uno spessore muscolare maggiore (pre/post-intervento) rispetto al gruppo con sovraccarico eccentrico, direttamente riconducibile ai dati raccolti per l'angolo di pennazione. Infatti, il gruppo convenzionale ha presentato significatività statistica nell'aumento dell'angolo di pennazione, con un incremento medio dell'8,86% (P-value = 0,0054), dimostrando che l'angolo di pennazione del fascicolo si adatta in risposta all'ipertrofia muscolare. Il motivo per il quale l'angolo di pennazione sia maggiore e statisticamente significativo nel gruppo convenzionale rispetto al gruppo con sovraccarico eccentrico può essere dimostrato dal fatto che il muscolo contraendosi in accorciamento abbia bisogno di maggiori unità contrattili disposte in parallelo e che quindi questo porti ad un aumento dell'angolo di pennazione (Reeves et al., 2009). Inoltre, la comparazione di incremento percentuale tra gruppo convenzionale e gruppo con sovraccarico eccentrico presenta una forte tendenza significativa (P-value = 0,0687) anche se non

statisticamente rilevante. Questo risultato dimostra che c'è una differenza sostanziale tra i due gruppi per quanto riguarda l'aumento percentuale dell'angolo di pennazione. Affermando che i due tipi di allenamento differiscano tra loro nell'aumento dell'angolo di pennazione. Da letteratura, il grado di pennazione muscolare determina la quantità di tessuto contrattile accumulato lungo tendine e lunghezza della fibra, ed è inoltre il riflesso della capacità generativa di forza, della velocità di accorciamento del muscolo e delle proprietà elastiche del complesso muscolo-tendineo (Narici, 1999). Per questo motivo, un suo cambiamento genera modificazioni adattative che possono alterare non solo le caratteristiche, in sé, della fibra, ma anche tutte quelle modalità di comportamento che caratterizzano il tessuto muscolare scheletrico come la trasduzione della forza. In questo caso, l'efficacia dei comportamenti adattativi relativi all'angolo di pennazione può essere attribuita all'allenamento convenzionale, mentre per l'allenamento con sovraccarico eccentrico troviamo differenti comportamenti adattativi che modificano altre caratteristiche del fascicolo muscolare, come la sua stessa lunghezza.

4.4 Considerazioni personali

I risultati ottenuti da questo studio hanno sostenuto la letteratura scientifica fino ad oggi pubblicata, confermandola. Il muscolo scheletrico reagisce alla contrazione concentrica con sovraccarico eccentrico con modalità uniche che sono ancora oggetto di studio. Questo elaborato di tesi sperimentale voleva cercare di rispondere a quelle che sono le domande inerenti ai dubbi, ancora presenti, sull'esercizio eccentrico. Gli studi effettuati negli anni hanno dimostrato la complessità della contrazione eccentrica e ad oggi sono ancora molti i dubbi relativi alle distinte modalità di adattamento del tessuto muscolare scheletrico a determinati tipi di contrazione muscolare. Per raggiungere dati statisticamente significativi risulterebbe utile aumentare il numero di partecipanti allo studio, per riuscire ad acquisire un quadro generale più ampio in riferimento alle caratteristiche descritte in questo elaborato di tesi. Gli adattamenti e i comportamenti del muscolo sono molteplici, confido che la comunità scientifica di ricerca, riuscirà con il tempo e i mezzi adeguati ad analizzare e comprendere definitivamente questi fenomeni, riuscendo a portare innovazione anche nel mondo sportivo e della riabilitazione. Oltre alla produzione maggiore di forza maggiore, al cambiamento dell'*optimum length* e alla creazione di maggiore stabilità strutturale a lunghezze maggiori, questi adattamenti muscolari possono contribuire, con il giusto protocollo di allenamento, alla diminuzione degli infortuni, al miglioramento della performance sportiva dell'atleta relativa alla specificità

sportiva con una programmazione adeguata, e al possibile trattamento della sarcopenia in soggetti anziani. Comunque, per certo, non si può affermare che sia un tipo di allenamento pericoloso o che possa nuocere alla salute, anche se comporta dei tipi di adattamento che a livello fisiologico sono considerati di danno o di infiammazione. Di certo si può essere sicuri del fatto che la contrazione eccentrica porti benefici alla persona che la utilizza, dato che né in questo studio, né in studi precedenti, sono state riscontrate criticità relative al protocollo di allenamento. Quindi l'obiettivo di questa tesi è stato quello di analizzare i cambiamenti morfologici del tessuto muscolare in condizioni di sovraccarico eccentrico, cercando di fornirne un'interpretazione innovativa rispetto alla letteratura.

BIBLIOGRAFIA

1. Blazevich AJ, Cannavan D, Coleman DR, Horne S. Influence of concentric and eccentric resistance training on architectural adaptation in human quadriceps muscles. *J Appl Physiol* (1985). 2007 Nov;103(5):1565-75. doi: 10.1152/jappphysiol.00578.2007. Epub 2007 Aug 23. PMID: 17717119.
2. Brughelli M, Cronin J. Altering the length-tension relationship with eccentric exercise : implications for performance and injury. *Sports Med.* 2007;37(9):807-26. doi: 10.2165/00007256-200737090-00004. PMID: 17722950.
3. 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." ("Architectural, functional and molecular responses to concentric and ...") ("Architectural, functional and molecular responses to concentric and ...") *Acta Physiol (Oxf)*. 2014 Mar;210(3):642-54. doi: 10.1111/apha.12225. PMID: 24387247.
4. Franchi MV, Reeves ND, Narici MV. "Skeletal Muscle Remodeling in Response to Eccentric vs. Concentric Loading: Morphological, Molecular, and Metabolic Adaptations." ("(PDF) Skeletal Muscle Remodeling in Response to Eccentric vs ...") ("Architectural, functional and molecular responses to concentric and ...") *Front Physiol*. 2017 Jul 4;8:447. doi: 10.3389/fphys.2017.00447. PMID: 28725197; PMCID: PMC5495834.
5. Fridén J, Lieber RL. Segmental muscle fiber lesions after repetitive eccentric contractions. *Cell Tissue Res.* 1998 Jul;293(1):165-71. doi: 10.1007/s004410051108. PMID: 9634608.
6. Hoppeler H. Moderate Load Eccentric Exercise; "A Distinct Novel Training Modality." ("Eccentric muscle contractions: from single muscle fibre to whole muscle mechanics") ("Effectiveness of combined eccentric and concentric exercise over traditional cardiac exercise rehabilitation programme in patients with chronic heart failure: protocol for a randomised controlled study") *Front Physiol*. 2016 Nov 16;7:483. doi: 10.3389/fphys.2016.00483. PMID: 27899894; PMCID: PMC5110564.
7. Kawakami Y, Abe T, Fukunaga T. "Muscle-fiber pennation angles are greater in hypertrophied than in normal muscles." ("Muscle-fiber pennation angles are greater in hypertrophied than in ...") ("In vivo behaviour of human muscle tendon during walking. -

- PMC”) J Appl Physiol (1985). 1993 Jun;74(6):2740-4. doi: 10.1152/jappl.1993.74.6.2740. PMID: 8365975.
8. Kawakami Y, Abe T, Kuno SY, Fukunaga T. Training-induced changes in muscle architecture and specific tension. "Eur J Appl Physiol Occup Physiol. 1995;72(1-2):37-43." ("Training-induced changes in muscle architecture and specific tension") ("Training-induced changes in muscle architecture and specific tension") doi: 10.1007/BF00964112. PMID: 8789568.
 9. Nosaka K, Newton M, Sacco P. Delayed-onset muscle soreness does not reflect the magnitude of eccentric exercise-induced muscle damage. Scand J Med Sci Sports. 2002 Dec;12(6):337-46. doi: 10.1034/j.1600-0838.2002.10178.x. PMID: 12453160.
 10. Nosaka K, Newton MJ, Sacco P. Attenuation of protective effect against eccentric exercise-induced muscle damage. Can J Appl Physiol. 2005 Oct;30(5):529-42. doi: 10.1139/h05-139. PMID: 16293902.
 11. Morgan DL., Talbot JA., The addition of sarcomeres in series is the main protective mechanism following eccentric exercise. ("The addition of sarcomeres in series is the main protective mechanism ...") ("The addition of sarcomeres in series is the main protective mechanism ...") Journal of Mechanics in Medicine and Biology. 2002;2(3n4), 421–431. doi:10.1142/S0219519402000423
 12. "Narici M. Human skeletal muscle architecture studied in vivo by non-invasive imaging techniques: functional significance and applications." ("Human skeletal muscle architecture studied in vivo by non-invasive ...") ("Comparing human skeletal muscle architectural parameters of cadavers ...") J Electromyogr Kinesiol. 1999 Apr;9(2):97-103. doi: 10.1016/s1050-6411(98)00041-8. PMID: 10098710.
 13. Reeves ND, Maganaris CN, Longo S, Narici MV. "Differential adaptations to eccentric versus conventional resistance training in older humans." ("Differential adaptations to eccentric versus conventional resistance ...") ("Differential adaptations to eccentric versus conventional resistance ...") Exp Physiol. 2009 Jul;94(7):825-33. doi: 10.1113/expphysiol.2009.046599. Epub 2009 Apr 24. PMID: 19395657.
 14. Timmins RG, Ruddy JD, Presland J, Maniar N, Shield AJ, Williams MD, Opar DA. Architectural Changes of the Biceps Femoris Long Head after Concentric or Eccentric Training. Med Sci Sports Exerc. 2016 Mar;48(3):499-508. doi: 10.1249/MSS.0000000000000795. PMID: 26460634.

15. Timmins RG, Shield AJ, Williams MD, Lorenzen C, Opar DA. Architectural adaptations of muscle to training and injury: a narrative review outlining the contributions by fascicle length, pennation angle and muscle thickness. *Br J Sports Med.* 2016 Dec;50(23):1467-1472. doi: 10.1136/bjsports-2015-094881. Epub 2016 Jan 27. PMID: 26817705.

RINGRAZIAMENTI

Grazie alla mia famiglia, per il costante supporto nel raggiungimento dei miei traguardi, sportivi accademici e professionali.

Grazie ai miei genitori, i miei migliori amici, per essere sempre stati dalla mia parte, per avermi sempre sostenuta in qualsiasi mia ambizione, ma soprattutto grazie per avermi rimproverata quando era giusto farlo. Grazie per avermi cresciuta spronandomi a credere nelle mie capacità e non distogliendo mai la vostra attenzione dal mio bene, grazie per aver messo i miei bisogni davanti ai vostri e per non aver mai dato per scontato i miei sogni, grazie per i consigli e per l'incitamento nell'andare sempre avanti nonostante le difficoltà. Ma soprattutto grazie per il vostro amore, non basta una vita per ripagarvi di tutto quello che mi avete donato.

Grazie alle mie nonne, grazie di cuore a tutte e due, non ho mai sentito la mancanza del vostro supporto, che provenisse da qui vicino a me, o da qualche altra parte un po' più lontano.

Grazie a mio fratello, il mio consigliere fidato, per avermi costantemente spronata ad essere la versione migliore di me stessa e a non mettermi mai in dubbio, grazie per essere stato accanto a me fino a questo momento, non vedo l'ora di diventare grandi insieme. In particolare, grazie ai nostri genitori, perché il miglior regalo che potessero mai farci siamo io e te, noi due, l'uno per l'altra.

Grazie alle mie migliori amiche, le mie sorelle, compagne di vita ora e per sempre, grazie per avermi accettata così come sono senza aver mai provato a cambiarmi, per essere sempre state le persone sulle quali contare, per aver sempre cercato di farmi capire quanto valessi e grazie per avermi insegnato a non mettermi mai in secondo piano. Grazie per l'affetto che mi dimostrate ogni giorno, lo percepisco e lo tengo stretto, cercando di restituirvelo al meglio delle mie capacità.

Grazie ai miei compagni di Università, non finirò mai di esprimere gratitudine a questa triennale per avermi donato voi e la vostra amicizia, porterò per sempre nel mio cuore le nostre risate durante le lezioni e i nostri discorsi nelle pause nel cortile del Teologico, le nostre lezioni pratiche di basket, calcio, pallavolo, rugby e l'amicizia incondizionata che mi donate. Grazie a voi, al confronto

accademico e a quello umano, ai vostri incitamenti e soprattutto alla vostra stima, grazie per l'aiuto che mi avete sempre dato, appunti, ripetizioni, consigli e incoraggiamenti.

Grazie alla mia compagna di squadra, siamo legate da un'amicizia così spontanea da non sembrare vera. Grazie per la persona che sei, al tuo affetto e alla tua sensibilità. Conosciute per caso, o per forza dato che eravamo le uniche due ragazze del corso di Scienze Motorie ad aver scelto il percorso di sport di squadra, ma unite da un legame così forte. Grazie per i ripassi, i viaggi verso le pratiche, gli aperitivi post lezione, l'ansia condivisa prima degli esami, ma soprattutto grazie per tutto quello che mi doni ogni giorno al di fuori dell'Università.

Grazie alla mia psicologa, parte integrante della mia crescita, dall'adolescenza fino all'età adulta, colei che più di tutti mi ha aiutato a capire il vero valore della mia persona e l'importanza delle mie emozioni. Se sono qui oggi è anche grazie a lei, a tutte le energie spese per cercare di farmi stare meglio, alla sua dedizione al lavoro e alla sua tenacia. Grazie per essere una persona splendida e una grandissima professionista.

Grazie ai miei amici dei balletti, siamo cresciuti insieme, tra sudore, vittorie, sconfitte, ore di prove e risate. Grazie per aver assiduamente dimostrato la stima che provate nei miei confronti e per avermi fatta sentire, ad ogni allenamento, gara o trasferta, sempre al posto giusto.

Grazie al mio preparatore fisico di fiducia, mia fonte di ispirazione, colui grazie al quale ho scoperto il mio obiettivo nella vita, grazie per aver creduto in me fin dal giorno zero, per avermi donato i tuoi insegnamenti e trasmesso le tue conoscenze, ma soprattutto per avermi trasferito con entusiasmo la tua passione facendola diventare anche la mia. Ti ho conosciuto come Assistente Professore ma con il tempo sei diventato un amico, un collega e una persona sulla quale posso sempre contare. Proprio per questo motivo, il percorso che ho fatto, sia accademico che professionale, e questa Laurea sono in parte tuoi.

Grazie a tutti i miei amici e amiche, per essermi stati accanto, nei momenti belli e nei momenti brutti, per il vostro supporto in questo mio percorso, per la curiosità e l'interesse dimostrato nei miei confronti durante questi tre anni. Grazie per aver sempre pensato che ce l'avrei fatta.

Grazie al mio relatore, che mi ha permesso di prendere parte a questo progetto, grazie per essere stato uno dei migliori professori che mai potessi avere durante questo mio percorso, un ricercatore eccellente, ma soprattutto una persona, la quale umanità ed empatia fa invidia a molti. Grazie per avermi capita e aver posto fiducia nelle mie capacità, senza dubitare di me neanche per un attimo.

Grazie a tutti i Professori che durante questi tre anni mi hanno trasmesso conoscenza e passione per un mondo che fino a qualche anno fa non sapevo neanche mi potesse appartenere, a coloro che, in un modo o nell'altro, mi hanno dato una mano. Grazie a tutti i Professori che mi hanno promossa, ma grazie anche ai Professori che mi hanno bocciata, insegnandomi che il percorso accademico è come un'escursione in montagna fatta di tante salite ma che prima o poi, dopo la curva, spiana.

Grazie, ai miei mali, alle mie difficoltà, ai miei dubbi, alle mie debolezze, alla mia tristezza e alla mia frustrazione, alle mie insicurezze e alla mia testardaggine. Grazie ai momenti bui, che mi hanno insegnato che la vita non finisce dopo la delusione, che la felicità non si esaurisce mai e, specialmente, che qualsiasi cosa accada c'è sempre chi è pronto a sostenerti, perché in fondo anche quando ti senti l'ultima persona sulla Terra, non sei mai solo veramente.

Grazie a me stessa, per non aver mai rinunciato a vivere, per essere sempre andata avanti, per aver superato difficoltà che consideravo insuperabili e per aver sorriso anche quando era l'ultima cosa che volessi fare. Grazie a me stessa per aver aperto gli occhi ogni mattina cercando un motivo valido per realizzare i miei sogni, provando ininterrottamente ad essere una persona migliore, per me stessa e per gli altri. Grazie alla mia attitudine, alla mia tenacia, alla mia competenza, grazie alla mia forza e al mio desiderio di vittoria, grazie alla mia irrazionalità, alla mia instabilità e alla mia follia.

Alla vita, una sola, un viaggio pieno di ostacoli, ma ricco di soddisfazioni.

Grazie alla vita e grazie alla felicità che provo nel viverla tutti i giorni.

Job's not finished – Kobe Bryant