UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA "FORO ITALICO"

Ph.D. program in Human Movement and Sport Sciences

34° Cycle - years 2018-2021

Dr. Riccardo Borzuola

Thesis:

Neurophysiological mechanisms underlying neuromuscular electrical stimulation

ABSTRACT (English)

Neuromuscular electrical stimulation (NMES) consists of evoking muscle contractions by applying percutaneous electrical stimuli through surface electrodes. This technique has commonly been used for improving neuromuscular function in both rehabilitation and training protocols. Several works indicated that NMES interventions may carry equal if not greater benefits compared to conventional protocols involving voluntary exercise.

However, it has been argued that NMES-evoked contractions are characterized by a unique motor unit recruitment pattern which strongly differs from the physiological one and possibly limits the extent to which motor function can be improved with a NMES based treatment.

Several strategies have been adopted to overcome the limitations related to NMES, either by modifying the stimulation parameters or the intervention protocols. In the recent years, the application of NMES superimposed to voluntary muscle contractions (NMES+) has proven the ability to carry considerably greater advantages in terms of muscle function compared to any other NMES treatment. Nonetheless, there is still a scarce understanding on the neurophysiological mechanisms underpinning NMES+. Therefore, the studies presented in this thesis propose an investigation of some of the neurophysiological adaptations that are related to NMES superimposed to voluntary exercise.

In the **first study**, we evaluated spinal reflex responses following electrical stimulation superimposed to voluntary contractions of the triceps surae muscles. The study indicated that NMES+ produced a significant potentiation of the spinal motor neuron excitability compared to passive NMES or voluntary exercise alone. These findings suggest that NMES+ induces a greater motor neuronal excitability, which, in turn, could lead to improved force generating capacities.

In the **second study**, we investigated cortical activation of the primary and secondary somatosensory areas in relation to spinal reflex excitability following NMES+, passive NMES and voluntary isometric contractions of the ankle plantar flexor muscles. The results confirmed an increase in spinal excitability in response to superimposed NMES as reported in the previous study. However, no changes were found at supraspinal level, indicating that neural changes are likely restricted to the peripheral level.

Several authors suggested that adaptations occurring at the motor unit level could be strongly associated with improvements of force generating capacities as those reported following NMES+ interventions. The motor unit discharge characteristics following NMES+ applied to the tibialis anterior muscle were evaluated in the **third study**. The analysis of high-definition electromyography showed an acute increase of motor unit discharge rates and decrease of recruitment threshold following three experimental conditions, including NMES+, passive NMES and voluntary exercise alone. These results indicated that acute exercise involving NMES superimposed to voluntary contractions induce adaptations at the motor unit level which could reflect an increase in neural drive to the muscle. Nevertheless, changes in motor unit discharge characteristics were similar after the three conditions, suggesting that acute treatment might not be sufficient to discern neural adaptation between exercises characterized by different types of contraction.

Overall, our research indicates that NMES+ promotes specific neural adaptations which could underlie the motor function improvements obtained with such intervention. The novel findings of the present studies provide a more comprehensive picture of the neural and physiological mechanisms underpinning NMES based interventions. This knowledge could have significant implications for the development of specific training and rehabilitation protocols.

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA "FORO ITALICO"

Dottorato di Ricerca in Scienze del Movimento Umano e dello Sport

34° Ciclo - anni 2018-2021

Dr. Riccardo Borzuola

Tesi:

Analisi dei meccanismi neurofisiologici coinvolti nella stimolazione elettrica neuromuscolare

ABSTRACT (Italiano)

La stimolazione elettrica neuromuscolare (NMES) consiste nell'evocare contrazioni muscolari applicando stimoli elettrici percutanei attraverso elettrodi di superficie. Questa tecnica è stata comunemente utilizzata per migliorare la funzione neuromuscolare sia nell'ambito della riabilitazione che nei protocolli di allenamento. Diversi studi sperimentali hanno dimostrato che interventi che coinvolgono l'applicazione di NMES sono in grado di apportare benefici uguali se non maggiori rispetto ai protocolli convenzionali basati unicamente su esercizi volontari.

Tuttavia, un cospicuo numero di ricercatori ha indicato che le contrazioni evocate dalla NMES sono caratterizzate da un peculiare reclutamento delle unità motorie che differisce fortemente da quello fisiologico e, molto probabilmente, limita le potenzialità di miglioramento della funzione motoria tramite protocolli basati su NMES.

Diverse strategie sono state adottate per superare le limitazioni legate alla NMES, tramite l'alterazione dei parametri di stimolazione o modificando i protocolli di intervento. Negli ultimi anni, l'applicazione della NMES sovrimposta a contrazioni muscolari volontarie (NMES+) ha dimostrato la capacità di indurre benefici, in termini di funzione muscolare, notevolmente superiori rispetto a qualsiasi altro tipo di protocollo NMES. Tuttavia, nella letteratura scientifica emerge ancora una scarsa comprensione dei meccanismi neurofisiologici alla base della NMES+. Pertanto, gli studi presentati in questa tesi propongono un'indagine su alcuni degli adattamenti neurofisiologici legati alla NMES sovrimposta all'esercizio volontario.

Nel **primo studio**, è stata effettuata un'analisi delle risposte riflesse spinali in seguito ad un esercizio acuto che prevedeva la stimolazione elettrica sovrimposta a contrazioni volontarie del

muscolo tricipite della sura. I risultati di questo studio hanno indicato che la NMES+ induce un significativo incremento dell'eccitabilità dei motoneuroni spinali rispetto alla NMES passiva o al solo esercizio volontario. Questi risultati dimostrano che la NMES+ porta ad una maggiore eccitabilità dei motoneuroni, il che potrebbe rivelarsi chiave nel miglioramento delle capacità di generare forza muscolare.

Nel **secondo studio**, è stata esaminata l'attivazione corticale delle aree somatosensoriali primaria e secondaria in relazione all'eccitabilità dei riflessi spinali dopo NMES+, NMES passiva e contrazioni isometriche volontarie dei muscoli flessori della caviglia. I risultati hanno confermato un aumento dell'eccitabilità spinale in risposta a NMES sovrimposta analogamente a quanto riportato nello studio precedente. Tuttavia, nessun cambiamento significativo è stato identificato a livello sopra-spinale. Ciò suggerisce che gli adattamenti neurali legati a questo intervento sono probabilmente limitati al livello periferico.

Diversi autori hanno indicato che gli adattamenti che si verificano a livello delle unità motorie potrebbero essere fortemente associati a miglioramenti delle capacità di generare forza come quelli riportati in seguito a protocolli di allenamento/riabilitazione a base di NMES+. Nel **terzo studio** sono state valutate le caratteristiche di scarica delle unità motorie in seguito a NMES+ applicata al muscolo tibiale anteriore. L'analisi dell'elettromiografia ad alta definizione ha mostrato un aumento della frequenza di scarica delle unità motorie e una diminuzione della soglia di reclutamento in seguito a tre condizioni sperimentali effettuate in acuto, tra cui NMES+, NMES passiva e contrazioni volontarie dei muscoli flessori dorsali della caviglia. Questi risultati suggeriscono che un esercizio acuto a base di NMES sovrimposta a contrazioni volontarie dei muscoli dorsi flessori della caviglia induce adattamenti a livello delle unità motorie che potrebbero riflettere un aumento del drive neurale diretto al muscolo. Tuttavia, le variazioni riguardanti le caratteristiche di scarico delle unità motorie sono risultate simili dopo le tre condizioni sperimentali. Ciò implica che l’esercizio in acuto potrebbe rivelarsi non sufficiente a discernere gli adattamenti neurali tra esercizi caratterizzati da diversi tipi di contrazione.

Nel complesso, la nostra ricerca indica che NMES+ promuove specifici adattamenti neurali che potrebbero essere alla base dei miglioramenti della funzione motoria dimostrati a seguito di tale intervento. I risultati degli studi presentati in questa tesi forniscono un quadro più completo dei meccanismi neurali e fisiologici alla base degli interventi che coinvolgono l’utilizzo di NMES. Questa approfondita conoscenza potrebbe avere implicazioni significative per lo sviluppo di protocolli ottimali per l’allenamento e la riabilitazione.