



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in:

INGEGNERIA BIOMEDICA

Tesi di Laurea:

**Valutazione della fatica muscolare mediante prove di
complessità**

Muscle fatigue evaluation through complexity measures

Candidato:

Simona Squartecchia

Relatore:

Prof.ssa Federica Verdini

Correlatore:

Dott. Alessandro Mengarelli

Correlatore:

Dott. Andrea Tigrini

Anno Accademico 2020-2021

*A mia zia Carolina,
sono sicura che con la tua curiosità e sete di conoscenza
avresti saputo consigliarmi anche per questo elaborato.*

Sommario

La fatica muscolare rappresenta un fenomeno assai complesso che dipende da molteplici cause e non ha un singolo modo di manifestarsi. Il monitoraggio della fatica muscolare durante l'esecuzione di un certo carico di lavoro è possibile tramite l'elettromiografia di superficie, con la quale si può misurare l'attività mioelettrica dei muscoli coinvolti durante lo svolgimento di un particolare esercizio fisico prescelto, che riesca ad esaltare le proprietà di interesse del gruppo muscolare preso in analisi. Il controllo dei movimenti motori sotto sforzo permette di analizzare approfonditamente i comportamenti sviluppati dai soggetti durante l'esecuzione di gesti richiesti. Per tale studio, due gruppi, il primo caratterizzato da soggetti sani e il secondo da soggetti patologici (precedentemente operati al tricipite della sura), svolgono Heel Rise Test a gamba singola, una procedura considerata funzionale per la valutazione dell'efficienza del gruppo muscolare oggetto di indagine. L'analisi svolta in questo lavoro consente di paragonare i risultati ottenuti dai due gruppi, mediante l'elaborazione di parametri estratti dai segnali elettromiografici caratterizzanti i muscoli soleo e gastrocnemio. La trattazione si basa sull'utilizzo di una misura di complessità, nella fattispecie l'entropia: l'obiettivo prefissato è quello di constatare se misure come l'entropia siano in grado di fornire features correlabili con l'insorgenza di fatica. Ciò implica verificare la presenza di una variazione dei valori entropici durante il corso del test che possa essere direttamente riconducibile all'insorgenza di affaticamento muscolare. Dopo essere stata esaminata in diversi casi, la misura entropica è stata considerata un ottimo parametro discriminatorio per la fatica. I risultati ottenuti mostrano una validità dell'entropia come indice di affaticamento per i soggetti sani, con riferimento ad entrambi i muscoli soleo e gastrocnemio, mentre i soggetti operati non mostrano alcun tipo di trend associabile allo sforzo, ciò significa che le ridotte capacità motorie che questi ultimi esibiscono non sono legate a manifestazioni di difficoltà nell'esecuzione del test, ma ad ulteriori cause probabilmente riconducibili al trauma subito e al conseguente trattamento chirurgico.

INDICE

1 INTRODUZIONE.....	8
2 VALUTAZIONE DEI PARAMETRI.....	13
2.1 Analisi della letteratura sulla caratterizzazione della fatica nell'Heel Rise Test su un gruppo di soggetti trattati chirurgicamente.....	13
2.2 Permutation Entropy (PE).....	20
3 MATERIALI E METODI.....	22
3.1 Popolazione.....	22
3.2 Descrizione test.....	22
3.3 Metodi	23
4 RISULTATI E DISCUSSIONE	27
5 CONCLUSIONI.....	36
ACRONIMI E ABBREVIAZIONI.....	39
BIBLIOGRAFIA.....	40

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1: anatomia del tricipite surale.....	10
FIGURA 2: suddivisione dello spettro miografico in bande frequenziali (gastrocnemio di controllo e del controlaterale).....	16
FIGURA 3: MPF per gastrocnemio e soleo dei soggetti sani.....	16
FIGURA 4: MPF per gastrocnemio del controlaterale e della gamba operata.....	17
FIGURA 5: suddivisione dello spettro miografico in bande frequenziali (gastrocnemio della gamba operata).....	17
FIGURA 6: suddivisione dello spettro miografico in bande frequenziali (soleo del gruppo di controllo e del controlaterale).....	19
FIGURA 7: andamento entropia per gastrocnemio e soleo dei soggetti appartenenti al gruppo di controllo.....	29
FIGURA 8: andamento entropia per gastrocnemio e soleo del gruppo dei soggetti operati performanti con la gamba controlaterale.....	29
FIGURA 9: andamento entropia per gastrocnemio e soleo del gruppo dei soggetti sani.....	31
FIGURA 10: andamento entropia per gastrocnemio e soleo del gruppo dei soggetti sani e operati.....	32
FIGURA 11: distribuzione dei valori relativi al gastrocnemio dei pazienti operati rispetto alla retta interpolante mantenuta dal gastrocnemio dei sani.....	34
FIGURA 12: andamento entropia per gastrocnemio e soleo del gruppo dei soggetti sani e operati.....	35
FIGURA 13: andamento entropia per gastrocnemio del soggetto n°8 appartenente al gruppo dei soggetti operati.....	38

INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 1: numero segnali relativi ai soggetti appartenenti al gruppo di controllo.....	24
TABELLA 2: numero segnali relativi ai soggetti appartenenti al gruppo patologico, differenziando la gamba controlaterale e quella operata	25
TABELLA 3: numero di ripetizioni effettuate dai soggetti appartenenti al gruppo di controllo.....	27
TABELLA 4: numero di ripetizioni effettuate dai soggetti appartenenti al gruppo patologico, differenziando la gamba controlaterale e quella operata.....	27

INDICE DELLE FORMULE

FORMULA 1: vettore di embedding (z).....	20
FORMULA 2: distribuzione di probabilità dei modelli ordinali (P).....	20
FORMULA 3: Permutation Entropy (PE).....	20
FORMULA 4: funzione MATLAB per il calcolo della Permutation Entropy.....	25
FORMULA 5: variazione percentuale soggetti sani.....	34
FORMULA 5: variazione percentuale soggetti patologici.....	34

1. Introduzione

Con il termine fatica si intende un fenomeno assai complesso causato da molteplici fattori di svariata natura che coinvolge diversi siti cellulari e meccanismi biochimici e che dipende dal tipo di esercizio svolto, dalla sua durata e intensità, quindi dal tipo di fibre che caratterizzano il muscolo coinvolto nel gesto atletico. Più propriamente, l'affaticamento muscolare indica la condizione di un muscolo ripetutamente stimolato ed obbligato a compiere un lavoro, anche in condizioni di ossigenazione insufficiente. Esso modifica le singole contrazioni muscolari causando un rallentamento nell'esecuzione sia della fase di contrazione che di quella di rilasciamento [1].

L'insorgenza di fatica può causare una perdita nel controllo della realizzazione del movimento, inoltre l'ampiezza di tale gesto risulta notevolmente minore rispetto alle ripetizioni iniziali per via di una maggiore difficoltà nell'esecuzione dovuta all'appesantimento del muscolo coinvolto [2]. Nella migliore delle ipotesi il continuo sforzo porta solamente ad un accumulo di acido lattico che esprime l'entità del debito di ossigeno che si instaura durante la fatica, ma con il prolungarsi della sollecitazione le condizioni non ottimali di esecuzione del movimento possono condurre ad infortuni, seri o moderati. La fatica muscolare, infatti, è considerata un importante indice di rischio per il verificarsi di traumi che, in alcuni casi, possono essere irreversibili: è stato dimostrato come un'adeguata condizione fisica può aiutare ad evitare la fatica, modificando o scongiurando tutti quei movimenti che possono arrecare affaticamento, soprattutto gesti che richiedono sforzi con sovraccarico [3].

Nel corso degli anni lo studio e il monitoraggio della fatica muscolare hanno acquisito sempre più importanza ed interesse in campo scientifico. Per questo lavoro si desidera osservare il comportamento degli arti inferiori, nello specifico del gruppo muscolare situato nel polpaccio, più correttamente identificato come tricipite surale (o tricipite della sura), composto da una coppia di muscoli, gastrocnemio (GAM) e soleo (SOL), che costituisce la quasi totalità del segmento anatomico in considerazione (Figura 1).

La procedura scelta consiste nello svolgimento di un particolare test chiamato Heel Rise Test (HRT), adatto per valutare correttamente la prestazione del tricipite surale, focalizzandosi soprattutto sulla resistenza del muscolo in quanto soleo e gastrocnemio

presentano una composizione di fibre muscolari prevalentemente rosse che permettono meglio l'adattamento a sforzi prolungati. L'HRT consta di una sequenza di ripetizioni compiute dal soggetto selezionato, posto su una pedana di forza, con una sola gamba; tale test (chiamato anche Calf Rise Test) è usato principalmente da clinici e ricercatori in medicina e nello sport per verificare le funzionalità del gruppo muscolare considerato.

Le ripetizioni svolte sono di tipo concentrico-eccentrico ed è di fondamentale importanza tenere il conto di tutte le ripetizioni fatte, solitamente di numero elevato. La caratteristica della contrazione muscolare (concentrica-eccentrica) fa sì che l'HRT possa essere utilizzato anche per valutare forza, fatica e potenza del muscolo coinvolto.

La procedura consiste nel ripetere, con la singola gamba scelta, un certo numero di ripetizioni, non definito a priori, e termina quando il soggetto non riesce più a compiere in maniera ottimale il movimento richiesto a seguito dell'insorgenza di fatica. Tale metodo risulta valido non solo per soggetti sani e che non presentano alcun tipo di problematica a livello degli arti inferiori, ma è comunemente utilizzato anche per fornire riscontri medici e riabilitativi a seguito di infortuni e incidenti [4]. Ciò, quindi, permette di mettere a confronto le prestazioni svolte dal gruppo di soggetti sani con quelle del gruppo di soggetti patologici, in modo tale da evidenziare le capacità funzionali della fascia muscolare, mantenendo le stesse condizioni di svolgimento del test e di elaborazione dei dati acquisiti.

Il lavoro di tesi ha come obiettivo considerare le prestazioni svolte non solo da un gruppo di soggetti sani, ma anche da un gruppo di soggetti patologici. Questi ultimi sono stati precedentemente sottoposti ad un intervento chirurgico riguardante l'utilizzo di un lembo del muscolo soleo come tessuto di copertura a seguito di un infortunio di non lieve entità. L'intervento in questione rappresenta un metodo utilizzato in chirurgia plastica e ricostruttiva per trattare diversi tipi di infortuni a livello degli arti inferiori, causati ad esempio da traumi, tumori, incidenti o infezioni che portano ad avere esposizione dei tessuti e perdita di sostanza.

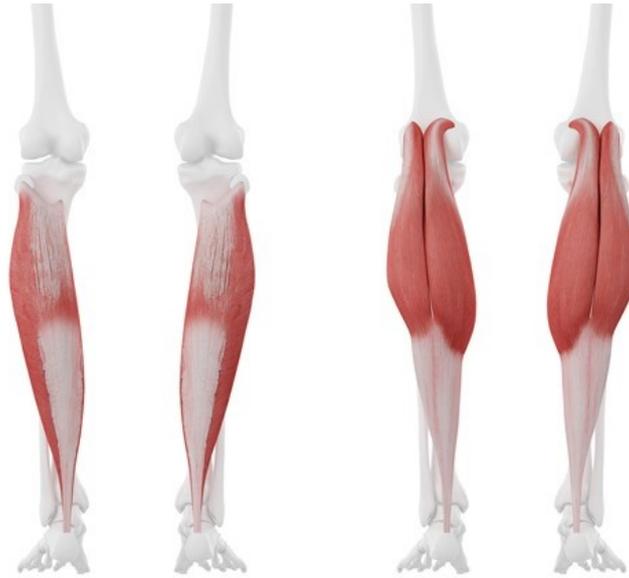


Figura 1: anatomia del tricipite surale, costituito da soleo (a) e gastrocnemio (b).

Come tessuto di copertura si può utilizzare sia tessuto cutaneo che muscolare. In quest'ultimo caso si possono impiegare lembi muscolari tratti, nel caso di traumi alle gambe, da una delle due teste del tricipite surale. Il lembo utilizzato come tessuto di rivestimento può provenire quindi dal gastrocnemio, ma più spesso è del muscolo soleo, quest'ultimo perciò è identificato come muscolo donatore per il rivestimento di tessuti morbidi. L'obiettivo principale della ricostruzione è chiaramente quello di offrire una copertura adeguata al trauma, per tale motivo viene svolto l'HRT che consente quindi di verificare se la scelta chirurgica fatta per la copertura estetica non abbia introdotto deficit motorio.

La tecnica generalmente più adottata per esaminare l'attività muscolare è l'elettromiografia di superficie (sEMG): essa permette di rilevare l'attività elettrica muscolare durante l'esecuzione di un determinato carico di lavoro. Il segnale acquisito può essere opportunamente elaborato per ottenere indicatori di fatica muscolare. L'elettromiografia (EMG) rappresenta una delle modalità più utilizzate per estrarre informazioni, ed in particolare l'elettromiografia di superficie è applicata in ambito di ricerca e diagnosi, per il coordinamento e il controllo motorio. L'impiego dell'sEMG si sta sempre più diffondendo per via delle sue caratteristiche di non invasività, facilità di impiego, acquisizione ed elaborazione del segnale ottenuto: l'analisi di quest'ultimo permette infatti di ottenere informazioni quantitative sulle condizioni di attività del

muscolo esaminato, sui tempi di attivazione muscolare, sull'intensità del movimento e del livello di fatica [5].

La maggioranza degli studi condotti per monitorare l'insorgenza di fatica genera, come risultato della trattazione dei segnali elettromiografici, indici nel dominio della frequenza, usati principalmente in lavori che richiedono lo stato di isometria durante la contrazione del muscolo [6,7]. I parametri estratti, come ad esempio la Mean Power Frequency (MPF) o la Median Frequency (FMed), sono stati quindi considerati finora come indicatori di fatica muscolare poiché mostrano una buona correlazione tra la fatica stessa e le misure effettuate nel corso dell'Heel Rise Test. Tuttavia, recentemente è stata ipotizzata la possibilità di implementare parametri non lineari per l'analisi dello sforzo motorio, non legati al dominio della frequenza, aprendo alla possibilità di una migliore analisi dei segnali sEMG per la valutazione della fatica muscolare: tra questi spiccano le misure di entropia, in particolar modo la Permutation Entropy (PE). L'entropia è stata provata in diversi ambiti biomedicali, ma è nuova la sua applicazione all'elettromiografia per ottenere indicazioni sulla condizione di affaticamento muscolare, per cui risulta interessante verificare la sua validità nella distinzione tra uno stato di fatica e uno di non fatica, sia considerando soggetti sani che patologici (come precedentemente indicato). È importante, perciò, riporre l'attenzione sull'entropia poiché essa risulta avere una minore complessità in fase di calcolo a livello di implementazione computazionale rispetto ai parametri definiti nel dominio della frequenza [3,8].

Lo scopo generale del lavoro eseguito è quindi quello di verificare il corretto utilizzo di una misura di complessità, l'entropia, per andare a riscontare l'insorgenza di fatica muscolare durante lo svolgimento dell'Heel Rise Test da parte di un gruppo di soggetti sani, ponendo interesse specialmente sul gruppo muscolare del tricipite surale (gastrocnemio-soleo). Una volta verificata l'eventuale validità dell'entropia per i soggetti sani, lo studio procede, nelle stesse modalità, ma considerando i soggetti patologici. Si va quindi a verificare se vi è un riscontro di fatica in tali soggetti per cui la funzionalità del tricipite surale è ridotta per effetto trauma subito e del successivo intervento. Vista la condizione di partenza di questo gruppo di pazienti, l'intento è quello di verificare se i soggetti siano arrivati ad affaticare il muscolo o se la terminazione del test sia dovuta al trauma originario.

L'obiettivo, a partire dai valori di entropia ottenuti, è quello di andare a constatare se misure di complessità come l'entropia stessa possano fornire features in grado di essere correlate con l'insorgenza di fatica, nel caso in cui quest'ultima dovesse instaurarsi nel corso del test svolto. In particolare, l'Heel Rise Test risulta essere un test funzionale per verificare l'efficienza del tricipite surale. Quando le ripetizioni vengono eseguite da soggetti sani, il termine della procedura stessa è determinato proprio dal manifestarsi della fatica che per gli individui in considerazione sicuramente arriva. Perciò, se vi è una variazione del trend della PE tra la condizione di assenza di affaticamento e insorgenza dello stesso, allora sicuramente si può confermare una certa corrispondenza tra l'entropia e l'affaticamento muscolare. L'andamento che quindi si ottiene, qualora dovesse presentarsi una diversificazione dei valori entropici tra lo stato iniziale e finale del test scelto, potrà permettere di ipotizzare l'entropia come indice di fatica. Successivamente, una volta dimostrata la validità delle misure entropiche per gli individui sani, si procede considerando i soggetti patologici per cui bisogna chiarire se vi sia la presenza di fatica ed eventualmente in che modo limita le capacità motorie residue. I risultati ottenuti mostrano inoltre che lo stato di fatica non arriva per i pazienti precedentemente operati, per cui le funzionalità ridotte sono riconducibili al trauma subito per cui essi si sono sottoposti in seguito al trattamento chirurgico, che non consente quindi ai soggetti di svolgere un cospicuo numero di ripetizioni, facendo terminare velocemente il test.

Le passate esaminazioni fornivano sempre come indicatori di fatica parametri definiti nel dominio frequenziale in quanto riuscivano ad evidenziare nettamente una variazione dei valori ottenuti tra le prime e le ultime ripetizioni durante l'HRT, e cioè un determinato andamento riconducibile alla fatica nel gruppo dei soggetti considerati per cui si suppone che tale condizione si sia verificata [9].

Validare la misura di entropia può rappresentare quindi un vantaggio in ambito di monitoraggio della fatica muscolare rispetto alle misure frequenziali poiché la Permutation Entropy fornisce un metodo promettente per caratterizzare la fatica anche in compiti dinamici per i quali le misure in frequenza classiche hanno limiti. Essa, infatti, riesce a delineare un trend tra la condizione iniziale di riposo e quella finale di presenza di fatica (qualora essa dovesse insorgere), inoltre a livello di implementazione durante la fase di calcolo risulta più facile da elaborare ed applicare.

2. Valutazione dei parametri

2.1 Analisi della letteratura sulla caratterizzazione della fatica nell'Heel Rise Test su un gruppo di soggetti trattati chirurgicamente

Da quanto emerso dalla letteratura scientifica relativa al monitoraggio della fatica muscolare a partire dal segnale elettromiografico di superficie (sEMG), la maggior parte delle sperimentazioni eseguite ha adottato come indicatori di fatica parametri nel dominio della frequenza, ipotizzati essere affidabili e altamente discriminatori per la caratterizzazione di segnali sEMG, correlati ai fenomeni fisiologici. Le analisi condotte nel dominio frequenziale rivelano la loro efficacia nel caratterizzare i segnali elettromiografici, infatti lo spettro di frequenza viene utilizzato per investigare le caratteristiche delle fibre motorie coinvolte, la loro dimensione e sincronizzazione, in generale quindi la natura del muscolo.

A partire dal segnale elettrico opportunamente registrato, il primo passo da compiere riguarda la selezione dei parametri, scelti tra indici nel dominio del tempo, della frequenza o di tempo-frequenza. I primi rappresentano generalmente i più semplici da utilizzare, di facile implementazione, ma successivamente superati dai secondi in quanto ritenuti di maggiore attendibilità, questo perché in molti casi la rappresentazione temporale non permette una buona percezione dell'informazione contenuta nel segnale. Per tale motivo le descrizioni in frequenza rappresentano un'alternativa interessante [3].

Tra queste spicca la Mean Power Frequency (MPF) [9]. La MPF è un parametro dello Spettro di Densità di Potenza (PDS) in grado di descrivere l'attività muscolare quando sono richiesti diversi livelli di forza nel corso dell'esercizio motorio, inoltre riesce a identificare correttamente la fatica muscolare durante contrazioni sia isometriche che dinamiche. Tuttavia, la MPF rappresenta una singola frequenza dell'intero spettro mioelettrico preso in considerazione, per cui fornisce una misura dell'intero spettro di potenza dell'attività muscolare in analisi. Per superare tale problematica e riuscire a considerare integralmente lo spettro del segnale miografico, è stata introdotta la possibilità di suddividere lo spettro in diverse bande di frequenza, da elaborare

opportunamente. La suddivisione dello spettro in più fasce frequenziali è stata vista come una procedura per analizzare i segnali sEMG durante compiti dinamici ed esaminare specifiche caratteristiche a livello muscolare, in relazione agli effetti della fatica.

Le considerazioni fatte finora sono utili per comprendere i risultati degli studi svolti su determinati soggetti patologici selezionati, cioè coloro che sono stati sottoposti in passato ad un intervento chirurgico riguardante soprattutto il muscolo soleo e l'utilizzo di un suo capo come rivestimento di ferite aperte a seguito di traumi. Nel dettaglio, approfondire la ricerca delle caratteristiche frequenziali del tricipite surale nei pazienti operati permette di conoscere accuratamente il gruppo muscolare e aggiungere ulteriori informazioni inerenti le sue funzionalità residue a seguito del trauma riportato, tenendo in considerazione il fatto che sono state apportate diverse modifiche a livello morfologico a causa proprio del trattamento chirurgico [9].

Nell'ultimo studio citato [9], è stato sottoposto un gruppo di soggetti patologici al test dell'Heel Rise, svolto sia con la gamba operata (OP) che con la gamba controlaterale (NOP), in modo tale da esaminare l'efficienza residua o completa del tricipite surale. Il numero dei sollevamenti richiesto non è stabilito all'inizio del test, quest'ultimo infatti termina quando i soggetti accusano fatica muscolare, per cui la ripetizione risulta non più facile da compiere. L'attività mioelettrica dei muscoli gastrocnemio e soleo è stata acquisita a partire da sEMG. Per ogni ripetizione è stato possibile definire la MPF, successivamente normalizzata al fine di comparare i dati acquisiti dai diversi individui in esame, ciò è stato reso possibile anche considerando le ripetizioni in intervalli percentuali in modo tale da ottenere un valore di MPF per ogni fascia percentuale. Rilevare la fatica da una eventuale variazione di MPF rappresenta il risultato principale a cui tale esame voleva pervenire, poiché il processo di analisi frequenziale è in grado di fornire caratteristiche, come la MPF, associate alla manifestazione di affaticamento.

In seguito, lo spettro del segnale è stato suddiviso in più bande per valutare se il tricipite surale trattato mostrasse proprietà diverse a seconda dell'intervallo frequenziale scelto e rispetto al controlaterale. Il potere discriminante degli indicatori ottenuti dalla suddivisione in fasce di frequenza è stato analizzato attraverso un processo denominato Machine Learning (ML), fondamentale per osservare quale caratteristica spettrale può

essere considerata la più significativa e indicativa nel rappresentare le differenze nell'attività motoria tra la gamba operata e quella non trattata, per il gruppo patologico, e tra quest'ultimo e un gruppo di controllo (CTR) considerato per porre in relazione i risultati ottenuti. L'alta interpretabilità garantita dal ML ha permesso di verificare quali fossero i parametri frequenziali più incisivi e adatti alla descrizione dei diversi comportamenti muscolari adottati dai soggetti analizzati. Inoltre, questo approccio ha consentito di localizzare le bande di frequenza più distintive, quelle cioè in cui si evidenziano differenze sostanziali tra i gruppi in considerazione, comprovando ulteriormente l'efficienza dei parametri in fase di selezione e classificazione degli stati di fatica-non fatica. La banda discriminante risultante è 40-80 [Hz] per il gastrocnemio del controlaterale e del gruppo di controllo di riferimento, perciò essa può essere vista come una feature caratteristica dello spettro mioelettrico per questo particolare muscolo (Figura 2).

Dalla letteratura è inoltre noto che è proprio la MPF ad essere utilizzata come parametro per la rilevazione di fatica: in condizioni di affaticamento muscolare, infatti, la MPF ottenuta in intervalli successivi di tempo presenta variazioni dei suoi valori, in particolare fornisce un trend decrescente durante il compimento dell'HRT, e quindi tale diminuzione rappresenta proprio la fatica che si instaura in fase di contrazione muscolare da parte dell'arto inferiore in sede di valutazione. Questa riduzione del valore di MPF all'aumentare del numero di ripetizioni è stata riscontrata considerando entrambi i muscoli gastrocnemio e soleo, esaminati singolarmente, nel gruppo di controllo, dato cioè dai soggetti sani (Figura 3), mentre per quanto concerne i soggetti operati la decrescenza è visibile solamente nel gastrocnemio della gamba controlaterale, cioè della gamba non sottoposta a trattamento (Figura 4). Dalle Figure 3 e 4 si delinea perciò un comportamento differente tra le prime ripetizioni compiute (inizio test) e le ultime (fine test), in cui l'insorgenza di fatica fa terminare i sollevamenti. È bene porre l'attenzione sull'andamento pressoché costante dei valori di MPF per la gamba operata per tutta la durata del test, fornendo un andamento molto diverso rispetto ai valori assunti dal gastrocnemio del controlaterale e del gruppo di controllo (Figura 4). Ciò è ulteriormente comprovato dall'analisi della banda di frequenza del muscolo gastrocnemio della gamba patologica, in cui non si ottiene corrispondenza con la fascia frequenziale determinata in precedenza (40-80 [Hz], Figura 5).

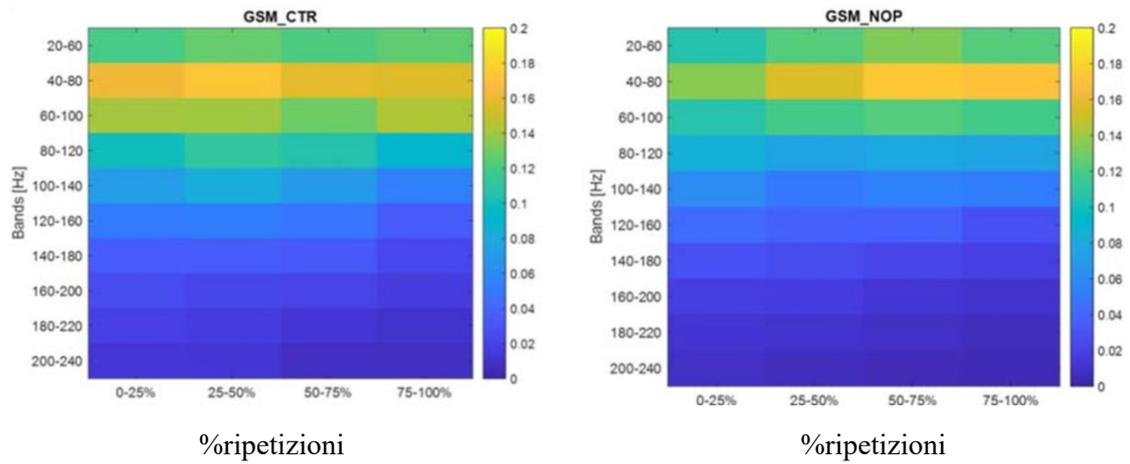


Figura 2: suddivisione dello spettro miografico in bande frequenziali, riportando il numero di ripetizioni svolte in intervalli percentuali. Gastrocnemio del gruppo di controllo (a), gastrocnemio della gamba controlaterale (b). Banda caratteristica: 40-80 [Hz] per entrambi i muscoli.

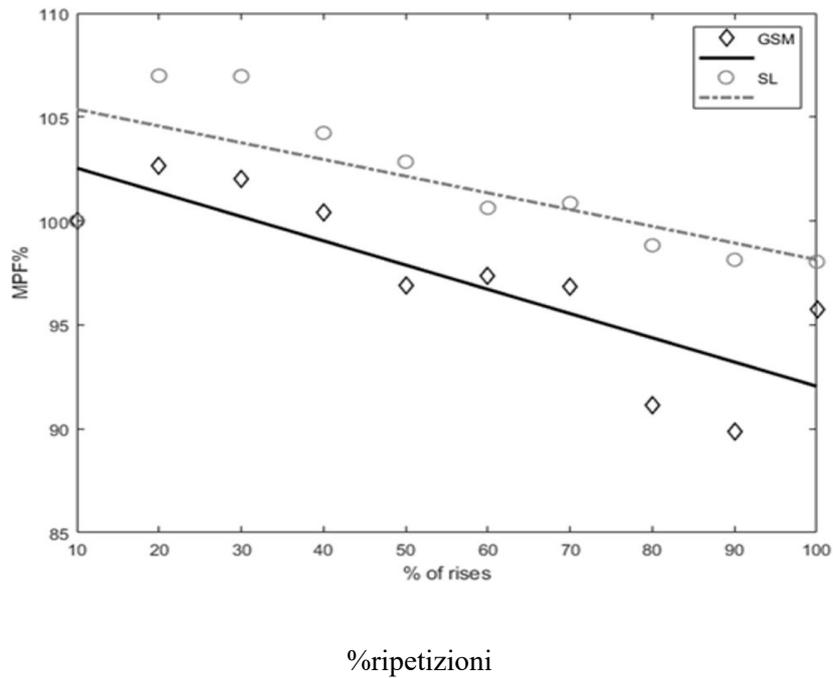


Figura 3: MPF per gastrocnemio (diamanti) e soleo (cerchi) dei soggetti sani. MPF e numero di ripetizioni sono dati in percentuale.

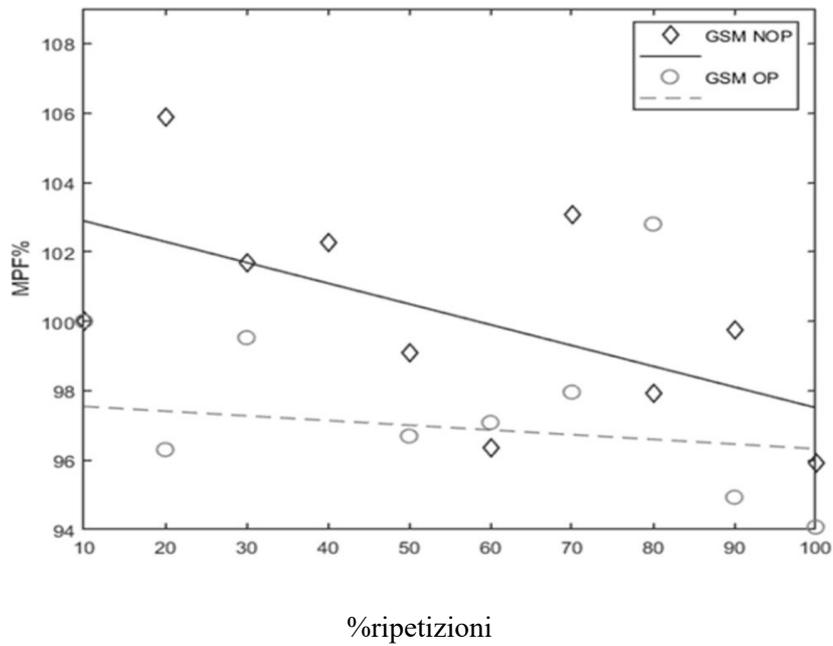


Figura 4: MPF per gastrocnemio del controlaterale (diamanti) e della gamba operata (cerchi). MPF e numero di ripetizioni sono dati in percentuale.

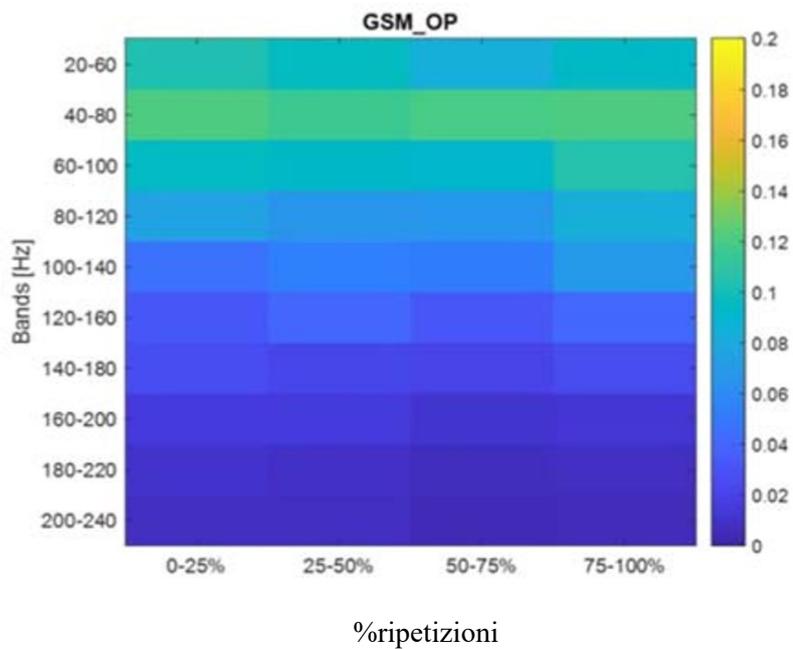


Figura 5: suddivisione dello spettro miografico in bande frequenziali, riportando il numero di ripetizioni svolte in intervalli percentuali. Gastrocnemio della gamba operata.

Questo ha dimostrato che il numero di ripetizioni, ridotto rispetto ai sollevamenti compiuti con il controlaterale e rispetto ai soggetti sani, non sia attribuito all'insorgenza di fatica, proprio perché la non presenza di un trend decrescente ben visibile ha permesso di ipotizzare che l'affaticamento non si verifichi affatto. Per di più, differenze sostanziali possono quindi essere evidenziate tra i tre muscoli finora esplorati. Il lavoro quindi da un lato permette di validare correttamente la Mean Power Frequency come indicatore di frequenza e rilevatore di fatica grazie alla variazione dei suoi valori all'aumentare del numero di ripetizioni, mentre dall'altro supporta l'assenza di fatica per i muscoli trattati chirurgicamente, per cui il termine del test non è dato dall'affaticamento stesso, ma è determinato da qualche altro fattore. In aggiunta alla MPF, l'uso del ML e l'analisi degli intervalli di frequenza ha permesso di affermare che non ci sono differenze importanti tra GAM_NOP e GAM_CTR per via delle loro perfette condizioni di salute.

Per quanto riguarda invece il muscolo soleo, quello relativo ai sani mostra una diminuzione di MPF all'aumentare della percentuale di ripetizioni (Figura 3), mentre il controlaterale fornisce trend costante, il che suggerisce una limitata presenza di fatica, a livello dei primi sollevamenti, oppure una totale assenza, nonostante entrambi preservino interamente le loro capacità motorie poiché non sono stati operati (Figura 4). Anche l'analisi delle bande caratteristiche fornisce intervalli diversi: la fascia descrittiva per il soleo di controllo è 80-120 [Hz], mentre il soleo del controlaterale risulta essere 40-100 [Hz] (Figura 6).

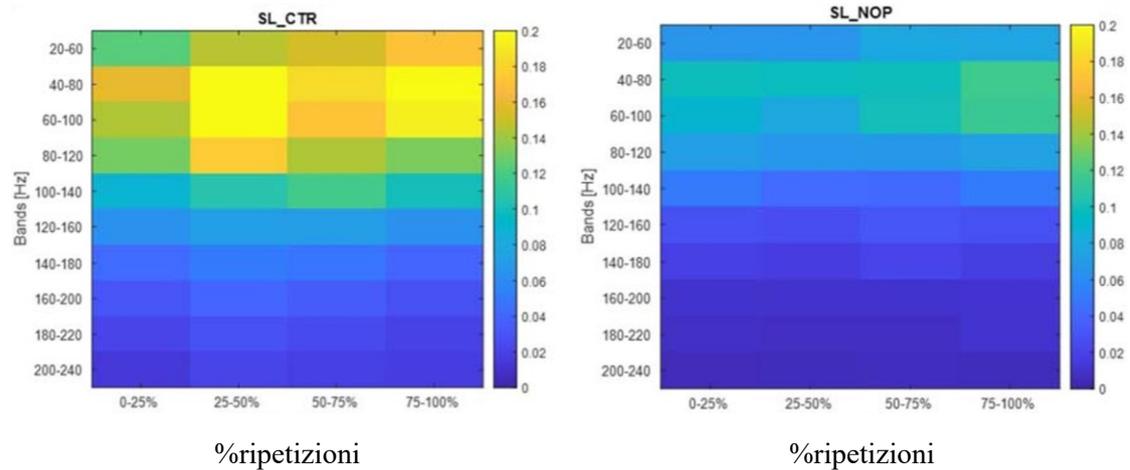


Figura 6: suddivisione dello spettro miografico in bande frequenziali, riportando il numero di ripetizioni svolte in intervalli percentuali. Soleo del gruppo di controllo (a), soleo della gamba controlaterale (b). Banda caratteristica: 80-120 [Hz] per il primo, 40-100 [Hz] per il secondo.

Complessivamente, quindi, gli studi riportati hanno raggiunto diversi risultati:

- L'indicatore più appropriato e più utilizzato nel dominio della frequenza per l'analisi delle prestazioni motorie durante HRT, a partire da segnali elettromiografici, è la Mean Power Frequency (MPF).
- La MPF è in grado di discriminare in maniera molto chiara i vari stati di fatica che descrivono il muscolo poiché, a seconda delle condizioni in cui è considerato, presenta un forte trend decrescente, sinonimo di affaticamento muscolare. Inoltre, l'analisi frequenziale e la suddivisione in bande, grazie anche all'applicazione del Machine Learning (ML), ha permesso di distinguere gli intervalli in cui i comportamenti dei vari muscoli in analisi si discostano tra loro, anche in relazione ai risultati del gruppo di controllo. Ancora una volta è bene sottolineare che grazie alla variazione dei valori di MPF si è potuta verificare una corrispondenza tra la MPF stessa e l'insorgenza di fatica muscolare.
- Differenze significative possono essere riconosciute nelle caratteristiche spettrali del segnale miografico tra soggetti sani e patologici, in particolare le funzionalità residue del tricipite surale che è stato considerato come donatore sono minori rispetto ad una condizione di normalità e questo non è necessariamente legato all'insorgenza di fatica, ma potrebbe essere correlato al trauma subito e al successivo trattamento chirurgico applicato al muscolo.

2.2 Permutation Entropy (PE)

La possibilità di considerare parametri non lineari per l'analisi della fatica muscolare è stata recentemente introdotta.

È stato comprovato da molteplici studi [3,8] che la Permutation Entropy (PE) rappresenta un vantaggio nell'elaborazione dei dati a partire dai segnali ottenuti da differenti applicazioni in ambito biomedicale. Tuttavia, non è ancora ben nota l'affidabilità di questa come possibile indicatore di fatica in relazione ai segnali sEMG, motivo per cui è stata soggetta a numerose indagini prima di affermare con certezza il suo corretto impiego come parametro discriminatorio di affaticamento. Perciò, tutte le informazioni che si conoscono riguardano l'utilizzo della misura di entropia in relazione a segnali ottenuti da altri tipi di valutazioni, quali l'Elettroencefalogramma (EEG) e l'Elettrocardiogramma (ECG) [8].

La PE è stata introdotta come uno strumento per descrivere la complessità delle serie temporali, è basata sulla mappatura di valori, disposti vicini tra loro, secondo modelli ordinali.

Considerando una serie temporale $x(i)$ di lunghezza N , la sua rappresentazione ha la seguente forma:

$$z_j^{m,\tau} = [x(j), x(j+\tau), \dots, x(j+(m-1)\tau)] \quad j=1,2,\dots,(N-(m-1)\tau) \quad (1)$$

dove z rappresenta il vettore di embedding, m è la dimensione di embedding ($m \geq 2$), τ è il ritardo di embedding, cioè il tempo che separa due campioni di serie temporali ($\tau \in \mathbb{N}$, solitamente posto a 1). È importante definire tutti i parametri prima della computazione, poiché da essi derivano i valori successivi di calcolo: tale tipo di entropia, infatti, dipende soprattutto da m . Gli elementi di ogni sottoserie di lunghezza m sono mappati in un modello ordinale. Da m si può in seguito procedere con il calcolo della permutazione π_i , producendo una distribuzione di probabilità dei modelli ordinali P , in formule:

$$P = \{p(\pi_i)\} \quad i=1,2,\dots,m! \quad (2)$$

Dalle analisi riportate, la selezione di m si evince essere cruciale ai fini dell'attendibilità della misura di entropia, quest'ultima si ottiene infatti come:

$$PE = - \sum_{i=1}^{m!} p(\pi_i) \ln(p(\pi_i)) \quad (3)$$

È bene far notare che m è l'unico parametro su cui si basa la stima di PE, ciò quindi può rappresentare un vantaggio in termini di peso computazionale.

Per dimostrare ulteriormente la maggiore validità delle misure di entropia, queste sono state comparate con una serie di indici estratti nel dominio di tempo e frequenza secondo il criterio di Minima Ridondanza-Massima Rilevanza (mRMR) [8]. La comparazione delle misure entropiche con i parametri frequenziali, applicati tutti nello stesso test (in questo caso la capacità di distinguere i vari gesti che un soggetto compie con la mano), permette di ottenere risultati migliori in termini di accuratezza e previsione dei primi rispetto ai secondi. In special modo, la PE fornisce risultati più convincenti rispetto alla Median Frequency (Fmed) e alla Mean Frequency (MF), cioè i parametri frequenziali classici più utilizzati per l'analisi elettromiografica in applicazioni sia ingegneristiche che cliniche. Queste ultime rappresentano lo strumento principale scelto per investigare il ruolo della fatica in attività muscolari.

Inoltre, come già accennato, l'entropia offre un minore costo a livello di implementazione in fase di calcolo per via della sua dipendenza da un singolo indice.

3. Materiali e Metodi

3.1 Popolazione

I soggetti selezionati per lo svolgimento dello studio e della valutazione della fatica muscolare mediante misure entropiche sono divisi in due gruppi: il primo gruppo, contenente 10 soggetti, è detto Gruppo di Controllo (CTR), costituito dai soggetti sani, coloro cioè che non hanno avuto alcun tipo di problematica agli arti inferiori e che quindi presentano piena funzionalità del tricipite surale; il secondo gruppo, contenente 9 soggetti, è costituito dai pazienti patologici, cioè coloro che precedentemente sono stati operati chirurgicamente applicando la procedura che vede un lembo del muscolo soleo come tessuto di rivestimento.

3.2 Descrizione test

L'esercizio scelto per valutare le funzionalità del gruppo muscolare è l'Heel Rise Test (HRT) a gamba singola, svolto su una pedana di forza del Laboratorio di Analisi del Movimento presso l'Università Politecnica delle Marche (UNIVPM). Tale procedimento consiste nello svolgere un sollevamento del tallone della gamba in appoggio, cercando di fare il maggior numero di ripetizioni possibili, cioè fino a quando il soggetto comincia a risentire dell'effetto della fatica. Il gesto motorio sviluppato è caratterizzato da una fase eccentrica e una concentrica, inoltre il numero di alzate da realizzare non è definito a priori, ma è diverso per ogni persona in quanto l'acquisizione dei dati si interrompe nel momento in cui il soggetto inizia ad accusare fatica, non riuscendo quindi a svolgere in maniera ottimale il movimento richiesto. Il numero di ripetute per ogni gamba rappresenta quindi un'informazione essenziale, dato che la

letteratura analizzata [5] indica che un soggetto con una sana funzionalità del tricipite surale riesce a compiere un numero di ripetizioni superiori a 20.

L'applicazione dell'Heel Rise Test risulta quindi un metodo efficiente per indagare le funzionalità del gruppo muscolare in analisi.

3.3 Metodi

Ogni ripetizione svolta da ciascun paziente durante l'HRT fornisce una serie di dati caratterizzanti la prestazione in esame. Queste informazioni sono presenti nei segnali di forza misurati dalle piattaforme e nei segnali ottenuti dalle sonde elettromiografiche poste sui muscoli in esame. Per tale lavoro di tesi si prenderanno in considerazione questi ultimi. I segnali sEMG vengono opportunamente segmentati in modo tale da individuare le porzioni di segnale relative a ciascuna ripetizione, a partire da una sequenza lunga contenente tutte le ripetizioni acquisite. Partendo dal segnale associato alla singola ripetizione, in base al muscolo a cui ci si riferisce si registra un segnale che rappresenta l'attività mioelettrica del gastrocnemio e, analogamente, uno che rappresenta le proprietà mioelettriche del soleo.

Con riferimento al primo paziente di entrambi i gruppi, l'identificativo adottato per ciascun soggetto e per ciascun muscolo è il seguente:

GAM_S1_1

SOL_S1_1

GAM_S1_NOP_1

SOL_S1_NOP_1

GAM_S1_OP_1

(dove S sta per Soggetto, il muscolo e la relativa gamba sono espressi dai caratteri alfabetici mentre il numero finale indica la ripetizione considerata, per questo esempio si fa riferimento alla prima).

I segnali EMG rilevati ed ottenuti per ciascun muscolo e per ciascun gruppo sono riportati in Tabella 1 e Tabella 2, dove vengono rispettivamente indicati i segnali acquisiti per ogni soggetto, in riferimento al muscolo esaminato.

Si noti come alcuni valori delle tabelle non sono considerati, per via di un errore in fase di acquisizione, per cui non tutti i segnali risultano disponibili. Inoltre, nella Tabella 2, la colonna riportante i segnali della gamba operata con riferimento al muscolo soleo non presenta registrazioni: ciò risulta facilmente ipotizzabile per via del trattamento chirurgico che riguarda il soleo stesso, poiché prevede la rimozione di una delle teste del tricipite surale, per cui non sono presenti segnali sEMG apprezzabili.

GRUPPO DI CONTROLLO		
	N° SEGNALI GAM	N° SEGNALI SOL
SOGGETTO 1	27	27
SOGGETTO 2	48	48
SOGGETTO 3	35	35
SOGGETTO 4	27	-
SOGGETTO 5	25	25
SOGGETTO 6	32	32
SOGGETTO 7	53	53
SOGGETTO 8	28	-
SOGGETTO 9	27	-
SOGGETTO 10	29	-

Tabella 1: numero segnali relativi ai soggetti appartenenti al gruppo di controllo.

GRUPPO SOGGETTI OPERATI				
	GAMBA CONTROLATERALE		GAMBA OPERATA	
	N° SEGNALI GAM_NOP	N° SEGNALI SOL_NOP	N° SEGNALI GAM_OP	N° SEGNALI SOL_OP
SOGGETTO 1	8	8	8	-
SOGGETTO 2	25	25	15	-
SOGGETTO 3	24	24	17	-
SOGGETTO 4	40	40	12	-
SOGGETTO 5	23	23	8	-
SOGGETTO 6	14	-	9	-
SOGGETTO 7	17	17	16	-
SOGGETTO 8	18	-	17	-
SOGGETTO 9	-	6	5	-

Tabella 2: numero segnali relativi ai soggetti appartenenti al gruppo patologico, differenziando la gamba controlaterale e quella operata.

La segmentazione del segnale elettromiografico e tutte le successive elaborazioni sono svolte con un opportuno software sviluppato in MATLAB 2021a.

Ad ogni singola ripetizione corrisponde un valore di entropia, calcolato mediante un'apposita funzione fornita:

$$\text{function [PermEn,WPermEn] = WPermEn(series,m)} \quad (4)$$

(con m dimensione del vettore di embedding, viene scelto $m=7$).

Questa fase è dunque ripetuta per tutti i segnali, sia relativamente al muscolo gastrocnemio che quello soleo, per entrambe le gambe e per entrambi i gruppi di

soggetti sottoposti all'HRT. Per ogni individuo appartenente al gruppo dei soggetti sani si ottengono quindi due valori di entropia, uno per GAM e uno per SOL, che descrivono una singola ripetizione. Per ogni individuo appartenente al gruppo dei soggetti patologici si ottengono le stesse quantità di valori se si considera la gamba controlaterale, mentre per quanto riguarda la gamba operata tutte le osservazioni si riferiscono al muscolo gastrocnemio.

I valori di entropia ottenuti sono normalizzati intra-subject per ridurre le differenze tra gli individui, cioè ogni misura entropica di un soggetto è divisa per il primo valore relativo alla prima ripetizione compiuta. Ciò significa che tutti i risultati, indipendentemente se l'individuo scelto appartiene al gruppo dei soggetti sani o di quelli patologici, partiranno ugualmente dal valore unitario.

Per validare correttamente la misura di entropia e dimostrare il suo impiego come indicatore di fatica, sono state selezionate e compiute diverse modalità di analisi.

Dato l'elevato numero di ripetizioni caratterizzanti il test, queste sono state trattate ad intervalli percentuali calcolati sulla base delle ripetizioni svolte da ciascun soggetto. Anche questa scelta operativa è stata svolta per permettere un confronto tra soggetti con differente numero di ripetizioni. Supponendo intervalli del 10%, si ottengono perciò 10 intervalli caratterizzanti le varie fasi del test in esecuzione. Per ciascun intervallo, le entropie ottenute sono state mediate, in modo tale da ottenere un singolo parametro che esprima il valore stesso in quel determinato range percentuale. In aggiunta, questa modalità di analisi attraverso le medie è stata applicata sia considerando i singoli soggetti (si costruisce un grafico, rappresentante l'andamento di entropia, per ogni soggetto), sia esaminando la media sull'intero gruppo (si ottiene un unico grafico caratteristico del test). Il tutto è stato svolto, come già accennato, sia per il gruppo di controllo che per il gruppo patologico.

Ulteriore metodo adottato in fase di studio è l'interpolazione dei valori entropici: per ogni andamento ottenuto viene mostrata la relativa retta interpolante, si riportano pertanto i dati dell'entropia ottenuti dal gruppo di individui considerato con la curva di regressione acquisita per il muscolo in esame. La retta interpolante evidenzia in maniera diretta l'eventuale trend che può essere individuato nei dati delle entropie.

4. Risultati e Discussione

Dal test effettuato risulta un numero sufficientemente elevato di sollevamenti compiuti dai soggetti del gruppo di controllo, per via delle condizioni fisiologiche integre del tricipite surale. Il numero di ripetizioni ad essi associato risulta paragonabile a quello dei sollevamenti effettuati dai patologici mediante la gamba controlaterale, mentre la gamba operata non permette di raggiungere un numero sufficientemente alto di ripetute.

GRUPPO DI CONTROLLO	
	N° RIPETIZIONI
SOGGETTO 1	27
SOGGETTO 2	48
SOGGETTO 3	35
SOGGETTO 4	27
SOGGETTO 5	25
SOGGETTO 6	32
SOGGETTO 7	53
SOGGETTO 8	28
SOGGETTO 9	27
SOGGETTO 10	29

Tabella 3: numero di ripetizioni effettuate dai soggetti appartenenti al gruppo di controllo.

GRUPPO SOGGETTI OPERATI		
	N° RIPETIZIONI GAMBA NOP	N° RIPETIZIONI GAMBA OP
SOGGETTO 1	8	8
SOGGETTO 2	25	15
SOGGETTO 3	24	17
SOGGETTO 4	40	12
SOGGETTO 5	23	8
SOGGETTO 6	14	9
SOGGETTO 7	17	16
SOGGETTO 8	18	17
SOGGETTO 9	6	5

Tabella 4: numero di ripetizioni effettuate dai soggetti appartenenti al gruppo patologico.

Per conseguire un monitoraggio completo delle funzionalità muscolari dei singoli individui ed ottenere risultati accurati che possano eventualmente determinare l'entropia come indice di affaticamento, la trattazione parte inizialmente esaminando i dati ottenuti dal gruppo di controllo di riferimento. Conseguentemente vengono valutati i dati ottenuti dal gruppo patologico, riferendosi sia al controlaterale che alla gamba operata.

Come riferito, l'indagine parte andando ad esaminare se l'entropia è in grado di evidenziare segni riconducibili alla fatica nel gruppo dei controlli per cui si suppone che tale condizione sia stata raggiunta. Una volta poi validata eventualmente tale ipotesi, si può proseguire lo studio, nelle stesse modalità, ma considerando le prove portate a termine dalla popolazione patologica. Si inizia dunque con la valutazione sui pazienti sani, osservando quindi entrambi i muscoli del tricipite della sura, gastrocnemio e soleo (GAM e SOL). Si vede come questi due muscoli, all'aumentare del numero di sollevamenti compiuti, presentino una variazione di entropia, in particolare è riconoscibile una diminuzione dei valori: la regressione, che evidenzia il trend decrescente delle entropie nel corso delle ripetizioni, è probabilmente associabile allo sviluppo di affaticamento muscolare durante il proseguimento del test (Figura 7).

Successivamente, le medesime tecniche di elaborazione dei segnali vengono applicate nell'indagine riguardante gastrocnemio e soleo della gamba controlaterale del gruppo dei pazienti, cioè l'arto non trattato chirurgicamente, che non presenta alterazioni fisiologiche. Anche per il controlaterale, l'analisi effettuata delinea un trend leggermente calante dato dalla diminuzione dei valori entropici all'aumentare del numero di ripetute: il decorso indicato è visibile sia per il muscolo gastrocnemio che per quello soleo (Figura 8).

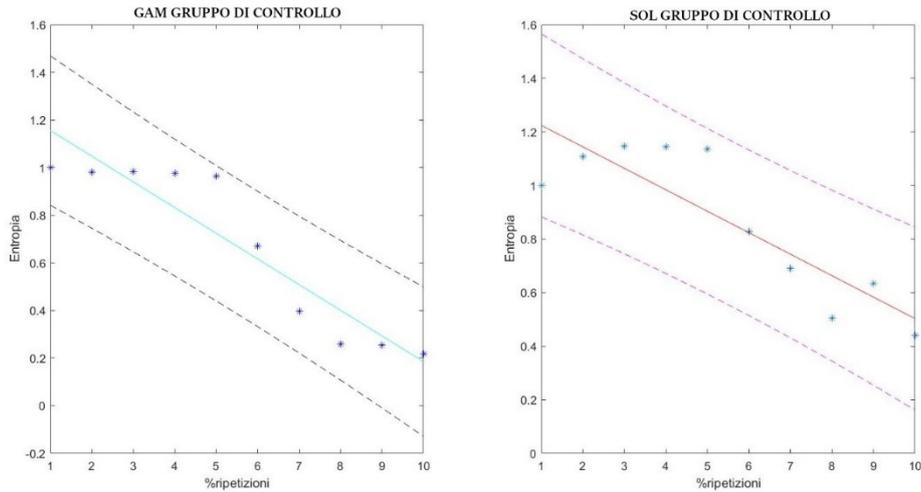


Figura 7: andamento entropia per gastrocnemio (CTR, a) e soleo (CTR, b) dei soggetti appartenenti al gruppo di controllo. Ripetizioni considerate ad intervalli del 10%. Media sul gruppo muscolare, valutazione all'interno di un range di variabilità determinato mediante retta interpolante (azzurra per gastrocnemio, rossa per soleo).

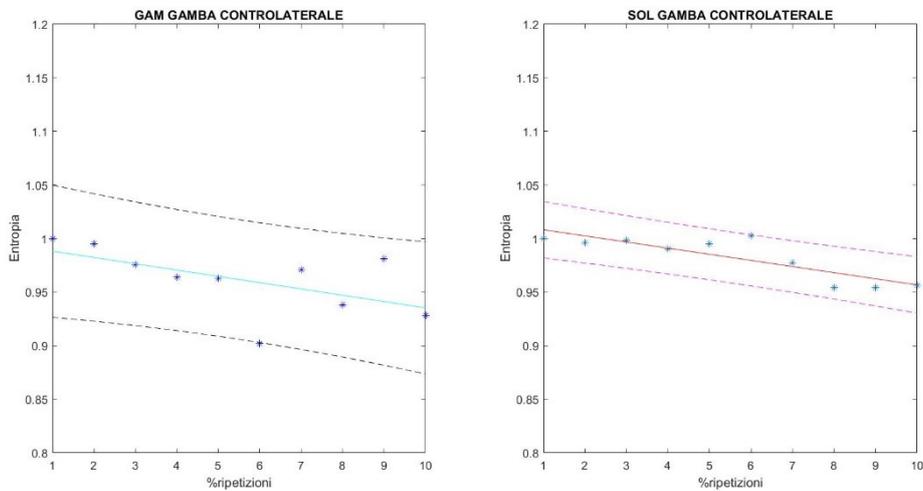


Figura 8: andamento entropia per gastrocnemio (NOP, a) e soleo (NOP, b) del gruppo dei soggetti operati performanti con la gamba controlaterale. Ripetizioni considerate ad intervalli del 10%. Media sul gruppo muscolare, valutazione all'interno di un range di variabilità determinato mediante retta interpolante (azzurra per gastrocnemio, rossa per soleo).

Per meglio evidenziare il trend osservato nel gruppo di controllo e per l'arto controlaterale del gruppo di pazienti, i dati del gastrocnemio e del soleo sono stati aggregati sfruttando l'ipotesi che le funzionalità di suddetti muscoli per i suddetti gruppi/arti siano paragonabili per via dell'integrità del tricipite surale.

L'ulteriore grafico che si ottiene riassume tutte le considerazioni fatte finora per i muscoli in esame. Complessivamente si perviene ad una tendenza decrescente per quanto concerne il gastrocnemio, mentre un trend leggermente meno visibile è legato alle prestazioni del soleo: è facilmente comprensibile il raggiungimento di tali esiti poiché il primo rispecchia le perfette condizioni di salute del muscolo gastrocnemio, in cui non sono rintracciabili eventuali differenze tra il gastrocnemio del gruppo di controllo e quello del controlaterale; il secondo grafico è legato invece alla presenza di una variazione delle entropie caratterizzanti il soleo della gamba controlaterale meno accentuata rispetto al soleo della gamba di controllo. Ciò potrebbe essere dovuto sia alle caratteristiche fisiologiche del muscolo stesso (la composizione di fibre muscolari rende il soleo più predisposto a sopportare fatica), sia probabilmente ad un effetto di bilanciamento durante l'attività motoria, da parte del controlaterale rispetto alla gamba operata, che viene risentito maggiormente dal soleo piuttosto che dal gastrocnemio, tendendo ad attenuare il decremento dei dati entropici associati al soleo della gamba di controllo. L'andamento ottenuto dai valori di entropia prodotti dai segnali associati al muscolo soleo suggerisce una resistenza maggiore alla manifestazione dello sforzo, per cui l'idea del possibile meccanismo di adattamento della gamba controlaterale rispetto alla gamba operata rimane attualmente non supportata dall'evidenza sperimentale.

Nel complesso, si hanno pertanto due trend in decrescenza che confermano prevedibilmente la presenza di fatica nei soggetti sani durante l'esecuzione di HRT che prevede un elevato numero di ripetizioni, per di più si avvalorano ulteriormente la credibilità dell'entropia come indice di fatica (Figura 9).

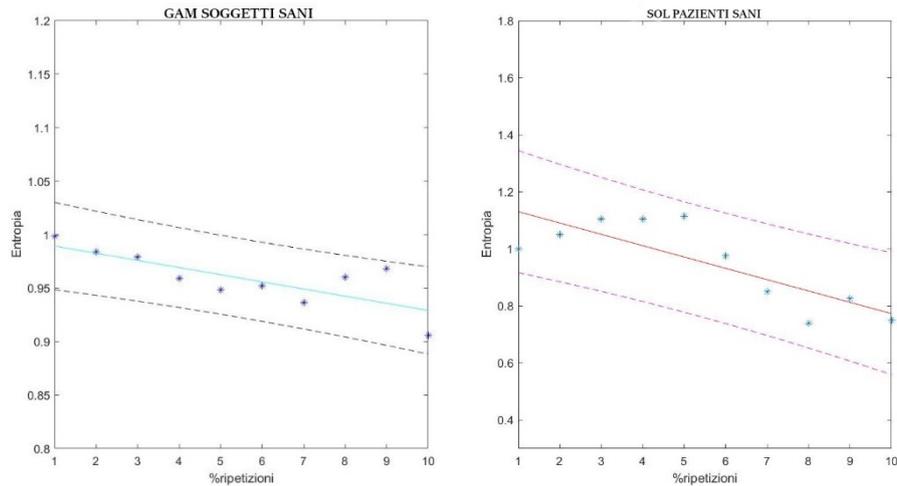


Figura 9: andamento entropia per gastrocnemio (CTR+NOP, a) e soleo (CTR+NOP, b) del gruppo dei soggetti sani. Ripetizioni considerate ad intervalli del 10%. Media sul gruppo muscolare, valutazione all'interno di un range di variabilità determinato mediante retta interpolante (azzurra per gastrocnemio, rossa per soleo).

Lo step successivo consiste nell'introdurre i soggetti patologici, ovvero quelli che hanno in precedenza subito il trattamento chirurgico e che quindi presentano il gruppo muscolare privato di una delle sue teste. Non è di rilevanza conoscere ulteriori informazioni riguardanti l'intervento, tuttavia si considera totalmente conseguito il recupero delle funzionalità motorie post-operatorie. Il gruppo è costituito da 9 individui che eseguono HRT con un numero di sollevamenti minore rispetto a quello associato alla popolazione sana: questo primo dato deve essere tenuto in considerazione per le successive osservazioni, poiché bisogna chiarire se ciò è dovuto ad una fatica che si manifesta più velocemente nel corso del test, a livello delle prime ripetizioni, oppure se le prestazioni sono influenzate da cause ulteriori, probabilmente legate al trauma subito e alla successiva operazione, che limitano lo svolgimento del test. In primo luogo, si riporta un confronto diretto tra i muscoli in analisi, vale a dire il gastrocnemio della popolazione sana, con l'aggiunta dei dati del controlaterale del gruppo patologico, (CTR+NOP) e il gastrocnemio della gamba operata (OP). Rimane invariato il grafico del muscolo soleo (Figura 10).

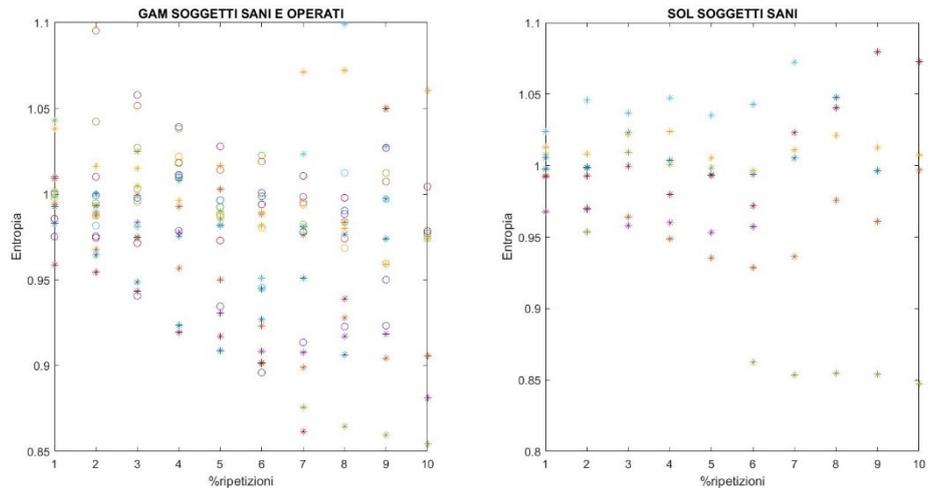


Figura 10: andamento entropia per gastrocnemio (CTR+NOP+OP, a) e soleo (CTR+NOP, b). Gastrocnemio dei sani (*), gastrocnemio dei patologici (°), soleo dei sani (*). Ripetizioni considerate ad intervalli del 10%. Media su intervalli del 10%.

La comparazione delle prestazioni riguardanti i muscoli gastrocnemio delle due popolazioni è ottenuta nelle stesse modalità di analisi ed elaborazione (media e intervalli del 10%), rimarcando l'attenzione sui singoli comportamenti di ciascun individuo: si ottengono perciò 10 grafici caratterizzanti la popolazione sana (*) e 9 grafici attribuibili invece alla popolazione patologica (°). La scelta di separare gli andamenti e assegnare ad ogni soggetto il rispettivo trend risulta efficace per mettere in risalto la presenza di una evoluzione dei valori di entropia che risulta essere piatta per quanto riguarda il gruppo dei patologici. Per i soggetti sani invece si ottiene ugualmente una diminuzione della misura entropica all'aumentare del numero di ripetizioni.

L'andamento piatto dei valori entropici riguardanti la popolazione patologica, ottenuto nella Figura 10, risulta fortemente contrastante con la diminuzione del parametro quando viene considerata la popolazione sana: questa discordanza in un primo momento potrebbe far ipotizzare l'assenza di fatica muscolare per tutta la durata del test, indipendentemente dall'intervallo percentuale considerato, che siano le prime ripetizioni, quelle centrali o le ultime, il risultato rimane indicativamente invariato. Per avere una visione più completa, si riportano i valori di entropia ottenuti dalla popolazione patologica con la curva di regressione ottenuta, per quel muscolo, dal gruppo di soggetti sani, in modo da verificare se si possa evidenziare un possibile

allineamento con il comportamento di riferimento (Figura 11). In Figura 11 si può meglio delineare la distribuzione dei dati del gruppo patologico rispetto alla dinamica individuata dal gruppo di controllo. Da quest'ultimo approfondimento si evince la tendenza dei dati della popolazione operata a rimanere costanti per tutto lo svolgimento del test, risultando evidente la differenza di comportamento tra la retta, fornita dall'interpolazione dei risultati dei sani, e lo sviluppo dei valori entropici del gruppo patologico. Da quanto emerso dai dati delle distribuzioni sui vari soggetti dei due gruppi e sulle medie dei gruppi, appare supportata l'ipotesi che la Permutation Entropy possa fornire indicazioni sulla sua validità come descrittore dell'insorgenza della fatica dai dati EMG. Inoltre, il chiaro divario che si presenta tra i valori relativi all'entropia dei pazienti operati e l'interpolazione rappresentante i soggetti non patologici permette di supporre che il numero minore di ripetizioni svolte dal gruppo operato è difficilmente attribuibile all'insorgenza di fatica muscolare poiché di fatto la non presenza di un apprezzabile trend decrescente dimostra una mancanza di affaticamento. Si ritorna quindi all'ipotesi iniziale riguardante la non necessaria manifestazione di fatica durante l'attività motoria come causa della limitazione delle prestazioni sviluppate a seguito del trauma, per cui sono altri i fattori scatenanti che riducono l'ampiezza e la resistenza dei sollevamenti rispetto alle alzate iniziali.

Quest'ultimo aspetto, ed in particolare le differenze che intercorrono tra le prestazioni dei due gruppi considerati, viene ulteriormente esaminato e comprovato da una successiva elaborazione grafica che riassume tutte le considerazioni precedenti, rimarcando i trend ottenuti per i muscoli scelti, sia per l'arto operato che per il controlaterale (Figura 12). Il diagramma prodotto paragona gli andamenti delle attività degli individui sani con quelli chirurgicamente trattati, considerando i valori medi espressi sull'intero gruppo dei soggetti esaminati (sia per GAM che per SOL). Le tendenze delle misure conseguite vengono evidenziate riportando anche le rette interpolanti, per presentare in modo del tutto soddisfacente la globalità dei risultati. Ancora una volta, si riscontrano due andamenti nettamente contrastanti tra il gastrocnemio del primo gruppo e quello del secondo gruppo, infatti nonostante si considerino le medie sul muscolo nella sua interezza e non distinguendo i singoli tracciati (uno per ogni persona, come nel caso della Figura 10) sia per la gamba della popolazione normale che quella patologica, si verificano le stesse evoluzioni in termini di misure entropiche in quanto i soggetti sani forniscono trend fortemente in diminuzione, mentre i patologici continuano a mostrare trend pressoché invariato per

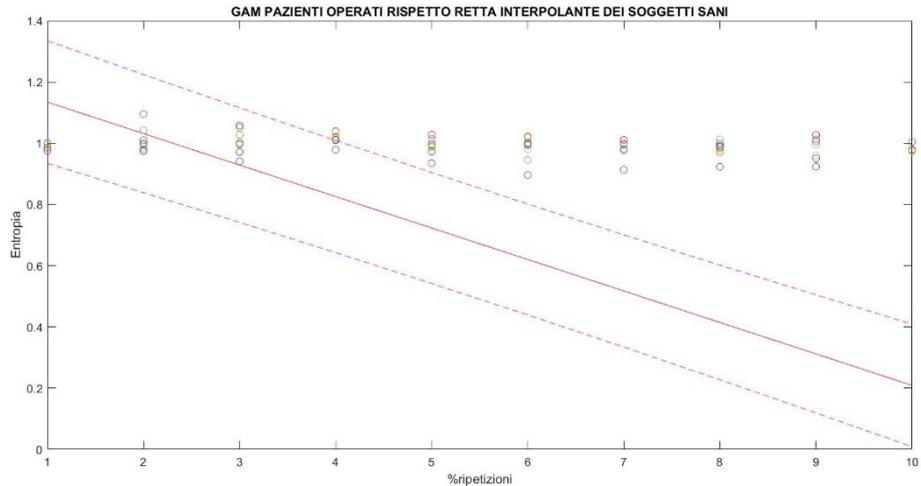


Figura 11: distribuzione dei valori relativi al GAM dei pazienti operati(o) rispetto alla **retta interpolante** mantenuta dalla popolazione dei GAM sani. N° pazienti=9. Media su intervalli del 10%.

tutto il corso del test. Per avvalorare maggiormente gli esiti ottenuti, è stato calcolato un ulteriore parametro, detto *variazione percentuale*, che permette di valutare effettivamente qual è la differenza numerica tra le ripetizioni svolte nella fase iniziale della procedura e quelle finali, relativamente al gastrocnemio della popolazione sana e di quella patologica, riportato in percentuale. La *variazione percentuale* è stata quindi calcolata sia sui dati dei patologici che sui dati dei controlli. Viene cioè svolto il seguente calcolo:

$$\text{Variazione percentuale soggetti sani \%} = \frac{\text{valore medio entropia nel primo intervallo (10\%)} - \text{valore medio entropia nell'ultimo intervallo (100\%)}}{\text{valore medio entropia nel primo intervallo (10\%)}} \quad (5)$$

$$\text{Variazione percentuale soggetti patologici \%} = \frac{\text{valore medio entropia nel primo intervallo (10\%)} - \text{valore medio entropia nell'ultimo intervallo (100\%)}}{\text{valore medio entropia nel primo intervallo (10\%)}} \quad (6)$$

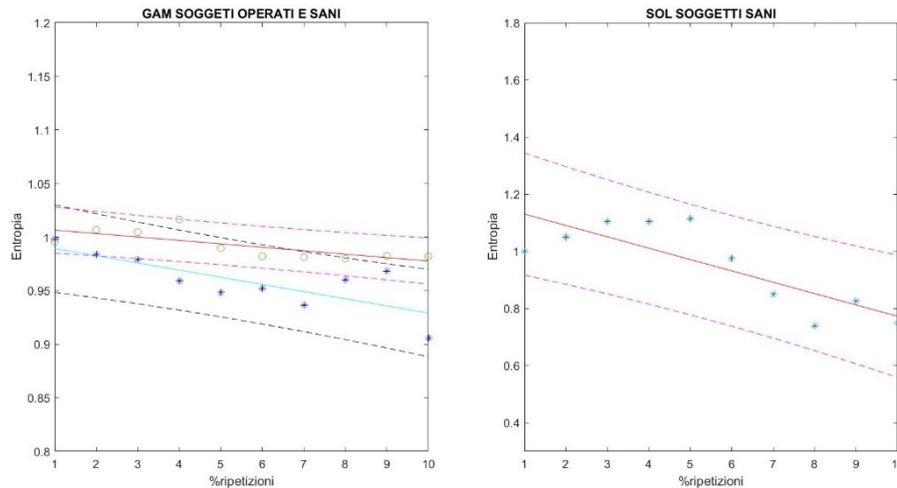


Figura 12: andamento entropia per gastrocnemio (CTR+NOP, a) e soleo (CTR+NOP, b) del gruppo dei soggetti sani, la figura (a) riporta anche il gastrocnemio dei soggetti operati (OP). GAM (*), retta interpolante azzurra, GAM_OP (o), retta interpolante rossa, SOL (*), retta interpolante rossa. N° soggetti sani=10, N°pazienti operati=9. Media sul gruppo muscolare, valutazione all'interno di un range di variabilità determinato mediante retta interpolante, sia per operati che per sani.

Nel primo caso si ottiene il valore di 9.27, nel secondo si ha invece 1.36: la variazione percentuale che viene estratta dal gruppo dei soggetti sani mostra che c'è notevole squilibrio tra i dati entropici caratterizzanti le prime ripetizioni e quelli specifici dell'ultimo intervallo percentuale, confermando l'effettiva riduzione del trend dei valori entropici nel corso dell'esecuzione del test e avvalorandone la sua interpretazione in relazione all'insorgenza della fatica. Il secondo indice di variazione percentuale invece è minore rispetto al precedente, in rapporto ad esso risulta quasi trascurabile in quanto indica uno scarto marginale tra i due intervalli considerati, a dimostrazione nuovamente dell'andamento approssimativamente costante dell'entropia associata ai gesti compiuti dai pazienti operati.

5. Conclusioni

Con il presente studio sono stati conseguiti risultati che evidenziano differenze che possono essere riconosciute confrontando i dati acquisiti a seguito dello svolgimento dell'Heel Rise Test da parte di soggetti sani e soggetti patologici precedentemente sottoposti ad un intervento chirurgico che prevede l'utilizzo di una delle teste del tricipite surale come tessuto di rivestimento di ferite. Le prestazioni messe a raffronto riguardano gli esiti ottenuti dalla gamba del gruppo di controllo, dalla gamba controlaterale e dalla gamba operata, considerando entrambi i muscoli del tricipite della sura (gastrocnemio e soleo) per le prime due, mentre per l'ultima si valuta solo il muscolo gastrocnemio.

Innanzitutto, è stato dimostrato come è possibile considerare le misure di complessità, specificatamente misure di entropia, come indicatori di fatica, poiché permettono di ottenere valutazioni in linea con quanto ottenuto in studi svolti considerando parametri nel dominio della frequenza, ma con più facilità in sede di implementazione. Tali parametri rappresentano un metodo promettente per caratterizzare lo stato di fatica anche in compiti dinamici per i quali le misure in frequenza presentano limiti. Risultano dunque più evidenti quei segnali riconducibili alla presenza di affaticamento. Il trend decrescente osservato nei soggetti sani, in cui si suppone che il test sia terminato a causa dell'insorgenza della fatica, lascia supporre che vi sia sicuramente una correlazione tra l'entropia considerata e la manifestazione dello sforzo.

Tutti i test condotti sui soggetti sani, infatti, con particolare focalizzazione sul muscolo gastrocnemio, sottolineano l'insorgenza di fatica muscolare che causa il termine del test, perciò la riduzione dei valori di entropia, soprattutto verso la fine della prova, viene segnalata da un apprezzabile trend decrescente. Il grafico in discesa che si ottiene risulta quindi associato alla manifestazione di affaticamento muscolare. Ad avvalorare tale esito positivo è l'ottenimento degli stessi risultati considerando sia i soggetti individualmente (cioè ogni soggetto è rappresentato dallo specifico grafico caratterizzante la singola prestazione), sia valutando tutto il gruppo di controllo.

Per quanto riguarda i soggetti patologici, risulta una limitazione motoria, dimostrabile attraverso il ridotto numero di sollevamenti della gamba associato ai pazienti in

questione. Con determinato riferimento al muscolo gastrocnemio, è possibile verificare che non vi è una tendenza decrescente evidente che possa far ipotizzare uno sviluppo di fatica durante lo svolgimento del test: ciò è stato dimostrato sia prendendo in analisi l'intero gruppo dei pazienti operati che le 9 persone separatamente, per cui i risultati forniti fanno intuire che non necessariamente gli individui precedentemente trattati chirurgicamente risentono dello sforzo durante la realizzazione delle ripetizioni. Il numero esiguo di ripetute, perciò, non è legato alla fatica muscolare, ma è più probabile che sia dovuto ad ulteriori fattori esterni, eventualmente connessi al trauma conseguito, che condizionano inevitabilmente e visibilmente l'esecuzione di determinate azioni motorie più o meno complesse.

È bene porre l'attenzione su un aspetto interessante legato alle prestazioni dei soggetti patologici, tale peculiarità è individuabile prendendo in considerazione l'individuo che compie il maggior numero di sollevamenti, pertanto, per questo lavoro, alla luce delle considerazioni appena illustrate, si prende in esame il paziente n°8 che svolge 17 ripetizioni (GAM_S8_OP): l'individuo in questione mostra un lieve andamento in calo, imputabile probabilmente all'insorgenza della fatica, maggiormente apprezzabile verso la fase finale dell'HRT, facendo quindi presupporre che se il numero di ripetizioni dovesse in un certo qual modo aumentare, verosimilmente si potrebbe trovare un riscontro di fatica anche nei soggetti operati. Essendo solo una supposizione, è lecito affermare che ulteriori studi serviranno in futuro per dimostrare tale ipotesi (Figura 12).

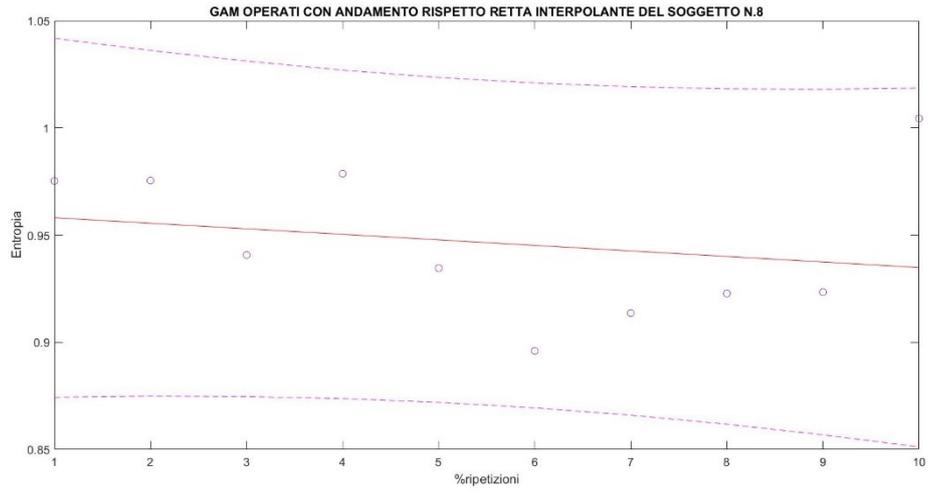


Figura 13: andamento entropia per gastrocnemio (OP) del soggetto n° 8 appartenente al gruppo dei soggetti operati. Ripetizioni considerate ad intervalli del 10%. Valutazione all'interno di un range di variabilità determinato mediante **retta interpolante**.

Acronimi e Abbreviazioni

HRT	Heel Rise Test
SOL	Soleo
GAM	Gastrocnemio
EMG	Elettromiografia
sEMG	Elettromiografia di superficie
PE	Permutation Entropy
PSD	Densità Spettrale di Potenza
MF	Mean Frequency (Frequenza Media dello spettro)
FMed	Median Frequency (Frequenza Mediana dello spettro)
MPF	Mean Power Frequency (Frequenza di Potenza Media)
ML	Machine Learning
EEG	Elettroencefalogramma
ECG	Elettrocardiogramma
mRMR	Algoritmo di Minima Ridondanza-Massima Rilevanza
CRT	Gruppo di controllo
OP	Gamba soggetti operati
NOP	Gamba controlaterale

Bibliografia

- [1] Covallero A. *Confronto tra metodi per l'analisi di manifestazioni elettriche di fatica muscolare in pazienti diabetici, con e senza vasculopatia periferica, e soggetti sani durante camminata su treadmill*. 2014
- [2] Enoka R M, Duchateau J. *Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function*. J Physiol (2008); 586(1):11-23
- [3] Murillo-Escobar J, Jaramillo-Munera Y E, Orrego-Metaute D A, Delgado-Trejos E, Cuesta-Frau D. *Muscle fatigue analysis during dynamic contractions based on biomechanical features and Permutation Entropy*. Mathematical Biosciences and Engineering (2020), 17(3):2592-2615
- [4] Hébert-Losier K, Wessman C, Alricsson M, Svantesson U. *Updated reliability and normative values for the stanfing heel-rise test in healthy students*. Phisioterapy (2017), 103(4):446-452
- [5] Svantesson U, Ostberg U, Thomeé R, Grimby G. *Muscle fatigue in a standing heel-rise test*. Scand J RehabilMed 30(2):67-72

- [6] Arjunan S P, Kumar D K, Naik G. *Computation and evaluation of features of surface electromyogram to identify the force of muscle contraction and muscle fatigue*. Biomed. Res. Int. 2014 (2014), 1–6.
- [7] Gonz'alez-Izal M, Malanda A, Gorostiaga E, Izquierdo M. *Electromyographic models to assess muscle fatigue*. J. Electromyogr. Kinesiol., 22 (2012), 501–512.
- [8] Mengarelli A, Tigrini A, Fioretti S, Cardarelli S, Verdini F. *On the Use of Fuzzy and Permutation Entropy in Hand Gesture Characterization from EMG Signals: Parameters Selection and Comparison*. Applied Sciences (2020); 10(20):7144
- [9] Ferracuti F, Fioretti S, Frontoni E, Iarlori S, Mengarelli A, Riccio M, Romeo L, Verdini F. *Functional evaluation of triceps surae during heel rise test: from EMG frequency analysis to machine learning approach*. Medical & Biological Engineering & Computing (2021); 59:41-56

Ringraziamenti

È giunto il termine di questo splendido percorso che mi ha permesso di crescere non solo come studentessa, ma soprattutto come persona. Non posso fare altro che ringraziare chi è stato al mio fianco nel corso di questi tre anni intensi, ricchi di soddisfazioni e colpi di scena.

Ringrazio in primis la mia correlatrice, prof.ssa Federica Verdini, che con i suoi collaboratori Alessandro Mengarelli e Andrea Tigrini mi ha accolto in laboratorio e mi ha guidato nell'esperienza di tirocinio e nella realizzazione dell'elaborato, mi sono sentita parte attiva di un vero gruppo di lavoro.

Menzione d'onore va a tutta la mia famiglia, specialmente i miei genitori e i miei fratelli, colonna portante della mia vita. Sono ciò che sono grazie a voi, siete sempre stati presenti in silenzio affinché riuscissi a percorrere la mia strada, senza influenzare le mie decisioni, ma assicurandovi che fossero le più giuste, frutto del vostro costante supporto e amore. Vi devo tutto.

Ringrazio gli amici di sempre, gruppo Palloncino, Creta, Cinema e Mare, in qualunque modo preferiate essere chiamati non cambia il bene che vi voglio, che mi avete dimostrato e che continuate a dimostrare anche nei piccoli gesti.

Ai miei coinquilini Matteo e Alessandro che hanno arricchito la mia prima vera esperienza da adulta, addolcendo i momenti di difficoltà tra una risata e qualche litigata. È stato poco il periodo di convivenza che abbiamo condiviso, ma ne è valsa sicuramente la pena.

A Micaela e Monica, mi sento molto fortunata e grata per aver incrociato le vostre strade e aver instaurato uno dei rapporti di amicizia più belli che potessi immaginare, mai avrei pensato di riuscire di nuovo a trovare delle persone come voi, capaci di conoscere la vera Simona.

Alla mia squadra di nuoto, siete arrivate nella mia vita in un momento di buio e avete risollevato il mio spirito, mi avete accolta subito come se fossi parte del vostro gruppo da sempre, sia in piscina che fuori.

Ultimo, ma non per importanza, ringrazio Filippo, la vera sorpresa di questo viaggio. Se 8 anni fa mi avessero detto che quel ragazzo ricciolino e timido fosse diventato una delle persone più importanti per me, probabilmente mi sarei messa a ridere. Sai già quanto io ti sia riconoscente, spero sia lo stesso anche per te.

A chi c'è stato, a chi ho incontrato e a chi ci sarà. Grazie di cuore.

Simona