



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO

Scuola di Dottorato in Scienze Morfologiche, Fisiologiche e dello Sport

Dipartimento di Scienze Biomediche per la Salute

Dottorato in Scienze dello Sport XXVI° ciclo

Tesi di Dottorato di Ricerca

LA FATICA NEUROMUSCOLARE NEL CALCIO: ASPETTI CENTRALI E PERIFERICI

Ermanno RAMPININI

Matr. n. R09328

Tutor:

Chiar.mo Prof. Giampietro Alberti

Chiar.mo Prof. Antonio La Torre

Coordinatore del Dottorato:

Chiar.mo Prof. Livio Luzi

A.A.
2012 - 2013

*A mia moglie Roberta,
ai miei due figli Riccardo e Federico e
alla terza creatura che arriverà
perché sono il senso della mia vita*

*A papà Gianni e a mamma Gabriella
per avermi sempre spinto a coltivare la mia passione*

*Ad Aldo Sassi
per avermi dato la possibilità di sviluppare la mia professionalità*

INDICE

ABSTRACT.....	7
1. INTRODUZIONE GENERALE	12
La fatica neuromuscolare	14
La fatica nel calcio	16
L'abilità di ripetere gli sprint	19
Scopo.....	23
2. LA FATICA INDOTTA DA UNA PARTITA DI CALCIO	25
Introduzione	26
Materiali e Metodi.....	28
<i>Soggetti</i>	28
<i>Disegno Sperimentale</i>	28
<i>Misura della funzionalità contrattile del muscolo</i>	29
<i>Il segnale elettromiografico</i>	30
<i>Il test di sprint</i>	31
<i>Il test di passaggio (Loughborough Soccer Passing Test)</i>	31
<i>La performance fisica nel corso della partita</i>	33
<i>La percezione del dolore muscolare</i>	33
<i>Parametri biochimici</i>	34
<i>Analisi statistica</i>	34
Risultati	34
<i>La performance fisica nel corso della partita</i>	34
<i>Massima contrazione ed attivazione volontaria</i>	35
<i>M-wave a funzionalità contrattile del muscolo</i>	36
<i>La capacità di sprint</i>	38
<i>Il test di passaggio (Loughborough Soccer Passing Test)</i>	40

<i>Percezione di dolore muscolare e parametri biochimici</i>	40
<i>Relazioni con la fatica di tipo centrale e con quella di tipo periferico</i>	40
Discussione	42
<i>La performance fisica nel corso della partita</i>	42
<i>La fatica dopo la partita</i>	42
<i>Influenza dei fattori di tipo centrale e di quelli di tipo periferici sulla fatica determinata dalla partita</i>	45
<i>Il recupero dopo la partita</i>	46
3. DISTRIBUZIONE DEI GOL REALIZZATI NEL CORSO DELLE PARTITE	48
Introduzione	49
Materiali e Metodi.....	49
<i>Procedure</i>	49
<i>Analisi statistica</i>	50
Risultati	50
Discussione	53
4. LA FATICA PERIFERICA INDOTTA DA UN ESERCIZIO DI SPRINT RIPETUTI: PEDALARE vs CORRERE	54
Introduzione	55
Materiali e Metodi.....	56
<i>Soggetti</i>	56
<i>Valutazioni neuromuscolari</i>	56
<i>I test di sprint ripetuti</i>	57
<i>Risposte fisiologiche e percezione dello sforzo</i>	58
<i>Analisi statistica</i>	58
Risultati	58

Discussione	68
<i>La performance nei test di sprint ripetuti: pedalare vs correre</i>	68
<i>Risposte fisiologiche e percezione dello sforzo</i>	68
<i>La fatica neuromuscolare degli estensori del ginocchio</i>	69
<i>La fatica neuromuscolare dei flessori plantari</i>	70
<i>Effetto della fatica sui rapporti low- vs high-frequency</i>	70
5. RIPETIBILITA' DELLA FATICA NEUROMUSCOLARE PERIFERICA INDOTTA DA UN ESERCIZIO DI CORSA INTERMITTENTE AD ALTA INTENSITA'	72
Introduzione	73
Materiali e Metodi.....	74
<i>Soggetti</i>	74
<i>Misura della funzionalità contrattile del muscolo</i>	75
<i>L'esercizio di corsa intermittente ad alta intensità</i>	76
<i>Analisi statistica</i>	76
Risultati	76
Discussione	82
<i>I parametri basali</i>	82
<i>I parametri sotto fatica</i>	82
<i>I cali percentuali</i>	84
<i>L'effetto della familiarizzazione</i>	84
6. VARIAZIONI STAGIONALI DELLA FATICA NEUROMUSCOLARE PERIFERICA INDOTTA DA UN ESERCIZIO DI CORSA INTERMITTENTE AD ALTA INTENSITA' ..	86
Introduzione	87
Materiali e Metodi.....	88
<i>Soggetti</i>	88
<i>Misura della funzionalità contrattile del muscolo</i>	88
<i>L'esercizio di corsa intermittente ad alta intensità</i>	89

<i>Risposte fisiologiche e percezione dello sforzo</i>	89
<i>Analisi statistica</i>	90
Risultati	90
Discussione	101
<i>I parametri basali</i>	101
<i>I parametri sotto fatica</i>	102
<i>I cali percentuali</i>	103
7. CONCLUSIONI	104
BIBLIOGRAFIA	112

ABSTRACT

Soccer is a team sport that requires prolonged high-intensity intermittent exercise. Physical aspects of match performance have changed a lot in the last forty years; for example total distance has increased from 7000-8000 m in the seventies to 10000-11000 m reported in recent investigations. Nowadays, during the match, players change activity on average every 5 seconds and perform approximately 1300 actions, with 200 of these being completed at high-intensity. In addition, the game involves other intense actions such as decelerations, kicking, dribbling, and tackling. All of these efforts exacerbate the physical strain imposed on the players and contribute to making football highly physiologically demanding. Furthermore, soccer players that compete at high level perform up to 70 matches during a single season. During the second half of a match, the total distance and high-intensity running decline markedly, with the amount of high-intensity running 20% to 40% lower in the last 15 min of the game compared with the initial 15-min period. A greater decrement in running is observed when more activity is performed in the first half. Furthermore, in the 5-min period following the most demanding 5-min of the game, the distance covered at high intensity is reduced by 6% to 12% compared with the game average. Collectively, these results indicate that players experience fatigue toward the end of a match and temporarily during a game. Accordingly, both single and repeated-sprint test performances are impaired after a high-intensity period during as well as at the end of the game. Fatigue may also have a negative impact on passing precision, with the less fit players showing a more pronounced deterioration in technical performance. Furthermore, maximal strength and jumping ability are also both reduced immediately after a match. The time required for a full recovery of these qualities in male players may be very long (> 72 h) (permanent fatigue). However, there is limited information regarding recovery time in high level athletes.

In literature, fatigue can be defined as an acute impairment of performance that includes both an increase in the perceived of the effort necessary to exert a desired force or power and/or reduction in the ability to exert maximal force or power. It has been demonstrated that the neuromuscular mechanisms that contribute to performance impairment differ according to the contraction mode, exercise intensity and the duration. Fatigue can be classified as central when the origin is proximal and/or peripheral when the origin is distal to the neuromuscular junction. However, to date, no studies have quantified the relative contribution of central and peripheral factors in determining fatigue in soccer. Peripheral skeletal muscle function can be determined using electrical stimulations and

classified as high-frequency and low-frequency (or long-lasting fatigue). Long-lasting fatigue can be evaluated using tetanic nerve stimulations at different frequencies (low- to high-frequency force ratio). Nonetheless, tetanic nerve stimulations are very painful, and their usability is limited. Paired stimulations have been proposed as a surrogate of the stimulation trains, and recent research demonstrates the validity of this method to quantify muscle fatigue induced by eccentric exercise.

In chapter 2, a study was conducted to determine the extent to which neuromuscular fatigue occurs in high-level professional soccer players. In addition to this, we aimed to examine recovery after a match and to examine its relationship with central and peripheral fatigue indicators. Maximal voluntary contraction (MVC), sprint and passing abilities, muscle soreness, maximal voluntary activation, EMG activity, and evoked quadriceps contractile properties (using different electrical stimulations) were determined before, immediately after, and at 24 and 48 h after the match in 20 male professional players. Immediately after a game, fatigue was evident from the reduction in MVC and sprint performance (-11%, $P < 0.001$ and -3%, $P < 0.001$, respectively) as well as increased muscle soreness ($P < 0.001$) compared with baseline. However, short-passing ability was seen to be preserved. This was observed alongside maximal voluntary activation and EMG activity being reduced by 8% ($P < 0.001$) and 12% ($P = 0.001$), respectively. M-wave characteristics were unchanged, whereas quadriceps mechanical responses to single and paired stimulations at 10 Hz resulted significantly reduced (peak torque = -8%, $P < 0.001$ and -9%, $P < 0.001$). Despite the observation of a partial recovery 24 h after the game, all variables returned to baseline values 48 h after the match. In high-level professional players, the fatigue induced by a soccer match occurs to a lesser extent than in lower level athletes and appears to be recovered in a faster fashion. Match-related fatigue is determined by a combination of central and peripheral factors. A relationship exists between central fatigue indicators, MVC and sprint performance decrements, whereas muscle soreness appears to be linked to peripheral fatigue indicators, in particular to mechanical responses at low-frequency stimulations.

In chapter 3, a study was conducted to determine the possible relationship between match related fatigue and goal scoring. Some preliminary observations indicate that goal scoring increases over time during the game; however, these preliminary results were obtained analyzing minor soccer leagues and/or using a limited amount of matches. The aim of this study was to examine the goal scoring patterns in four major European leagues (English Premier League, French Football Ligue 1, Italian Serie A and Spanish Football Liga) across three consecutive seasons (2008–09, 2009–10 and 2010–11).

Chi square analysis revealed a significantly ($P < 0.001$) higher goal scoring frequency in the second half (55.1 %) compared to the first half (44.9 %). With 15-min interval analysis highlighting a significant ($P < 0.001$) upward trend in the number of goals scored as time progressed (13.7, 15.1, 16.2, 17.7, 17.2 and 20.2 %, for 0–15, 15–30, 30–45, 45–60, 60–75 and 75–90 intervals respectively). The main finding of the present study is that, in the four major European soccer leagues investigated, the amount of goals scored is greater in the second half, with the scoring rate being highest in the last 15-min of a match. Fatigue occurring during the game may play a role; however, fatigue alone cannot explain the differences. The state of the games result and the reduced time available for scoring are other potential contributing factors to the increased goal scoring patterns observed in the latter stages of the game.

Repeated-sprint ability (RSA) is defined by the ability to perform several sprints interspersed with brief recovery periods. RSA is an essential component of many team sports like soccer and is deemed to be an important determinant of physical performance. Several studies have been carried out to establish the physiological determinants of RSA and to investigate the fatigue mechanisms related to this particular form of exercise in order to improve performance. However, no study to date has investigated the high- and low-frequency fatigue induced in more than one muscle group involved during fatiguing RSA exercise. In chapter 4, a study was presented aimed to investigate peripheral fatigue in Knee Extensor (KE) and Plantar Flexor (PF) muscles RSA cycling and running tests. Both RSA tests consisted of 5 x 6 s sprints and peripheral fatigue was quantified using diverse electrical stimulations (from a single stimulus to paired stimulations at 100 Hz). The main findings were that RSA cycling induced higher decrements in peak torque (PT), maximal rate of torque development and relaxation of KE compared with running (PT decrements at different stimulation frequencies: -39% to -53% cycling vs -16% to -39% running, $P < 0.049$). The PT ratios of KE measured using several low- and high-frequency stimulations did not highlight differences in low-frequency fatigue induced by the two exercise modes. On the contrary, no major differences were noted in PT decrements of PF ($P > 0.231$). However, the higher decrements of some PT ratios of the PF (10/100 Hz, 20/50 Hz and 20/100 Hz) confirmed the presence of low-frequency fatigue following RSA cycling. Subjects also reported significantly higher values for RPE leg following RSA cycling (8.2 vs 7.3 respectively, $P = 0.018$) despite no differences in blood lactate, hydrogen ions and bicarbonates concentrations ($P > 0.467$). The higher level of peripheral fatigue induced by RSA cycling may be partially related to longer fractional

duration of muscle contraction phases which can limit local blood flow. The discrepancies in neuromuscular fatigue between KE and PF can be partially explained by differences in muscle fibre composition and/or muscle contributions during RSA tests.

A number of studies have determined the reproducibility of peripheral muscle contractile properties at rest reporting good values of coefficient of variation. Only one study has assessed the reliability of the quadriceps contractile properties in a fatigued state. This was achieved using a sustained (2 minutes) maximal isometric contraction. However, this form of exercise is far from specific for the majority of sporting performances. In order to use electrical stimulations as a tool to determine the extent of peripheral muscle fatigue experienced by athletes it is necessary to carry out methodological studies that establish the reliability of peripheral muscle fatigue measures caused by a specific exercise. For these reasons, in chapter 5 a reliability study was conducted to determine the reproducibility of peripheral fatigue induced in knee extensors by high-intensity intermittent running test (HIT). The reliability of the assessment of peripheral fatigue was established in ten amateur soccer players (age: 18 ± 1 , height: 178 ± 5 cm, weight: 68 ± 8 kg). Transcutaneous electrical stimulations before and after HIT determined knee extensors muscle contractile properties on three separate occasions (T1, T2 and T3), each separated by 7 days. No significant differences were noted for any of the parameters measured ($P = 0.101$). The ICC values for peak torque (PT) varied from moderate to high, with the exception of PT at 10 Hz calculated comparing T2 vs T1 (range PRE = 0.78 - 0.92; POST = 0.76 - 0.97). The ICC derived from PT percentage decrements data were all low, with the exception of PT decrements at 1 Hz calculated comparing T3 vs T2 (ICC = 0.85, moderate). The TE for all contractile parameters obtained using 1 Hz and 100 Hz electrical stimulations were below 10%, including some that demonstrated a TE lower than 5%. Muscle contractile properties determined using 10 Hz stimulations showed a higher level of TE (range: 3.2 - 15.1%). Similar results were obtained for maximal rate of torque development and torque relaxation. From the results of this study it can be concluded that muscle contractile properties express a good level of reliability in baseline and post-exercise measures following familiarization.

In chapter 6, seasonal variations in peripheral neuromuscular fatigue induced by HIT were established in two groups of professional soccer players: eleven adult players (age: 23 ± 3 , height: 181 ± 4 cm, weight: 78 ± 6 kg) and twelve young players (age: 17 ± 1 , height: 181 ± 4 cm, weight: 71 ± 5 kg). Transcutaneous electrical stimulations before (PRE) and after (POST) HIT determined knee

extensors muscle contractile properties on four separate occasions during a season (before the preparation period Test 1, after the preparation period Test 2, in the mid of competitive period Test 3 and towards the end of the competitive period Test 4). Muscle contractile properties at rest were partially reduced during the competitive period both in adult and young professional players (reduction of PRE maximal rate of torque development at 1 Hz ($P < 0.024$) and the same parameter at 10 Hz ($P < 0.022$)). Analysis of POST parameters, confirmed the reduction of the high-frequency fatigue levels during the competitive period for adult players (higher values of POST peak torque at 100 Hz ($P = 0.006$) and POST maximal rate of torque relaxation at 100 Hz, $P = 0.009$). Furthermore, in young players, the reduction of both high-frequency fatigue and low-frequency fatigue were evident (POST maximal rate of torque development at 100 Hz ($P = 0.035$), POST maximal rate of torque relaxation at 100 Hz ($P = 0.009$), POST peak torque at 10 Hz ($P = 0.038$) and POST 10/100 Hz ratio ($P = 0.012$). Considering percentage decrements, several parameters confirm the presence of lower level high-frequency and low-frequency peripheral fatigue both in adult and young players during the competitive period. These results suggest that it is possible to use the assessment of muscle contractile properties to monitor soccer players physical condition.

In conclusion, fatigue in soccer is determined by a combination of central and peripheral factors. Central fatigue is evident immediately after and in the hours of recovery following a match (permanent fatigue). While peripheral fatigue is more evident considering some aspects of soccer performance characterized by short high-intensity periods (temporary fatigue). Peripheral fatigue include both high-frequency and low-frequency fatigue with the latter being more evident in young players. Training interventions and strategies applied to improve performance levels should take these aspects into consideration.

Capitolo 1
INTRODUZIONE GENERALE

Il calcio è senza dubbio lo sport più praticato al mondo sia a livello agonistico sia a livello amatoriale. In Italia si calcola che i calciatori agonisti sono più di un milione, mentre le persone che praticano il calcio a livello amatoriale sono più di quattro milioni. Per questi motivi, il calcio ha un elevatissimo impatto sociale ed economico e la ricerca scientifica finalizzata all'ottimizzazione della pratica calcistica è diventata sempre più importante. Basti pensare che negli ultimi 5 anni sono stati pubblicati su riviste scientifiche indicizzate circa 2500 articoli sul calcio con una crescita media annua del 10-15%.

Anche grazie alla ricerca scientifica, la performance fisica dei calciatori si è notevolmente evoluta nel corso degli anni. La distanza totale percorsa da un giocatore nel corso di una partita è aumentata da 7000-8000 m negli anni settanta (Reilly and Thomas, 1977) agli attuali 10000-11000 m (+40%) (Bradley *et al.*, 2013). Della distanza totale circa 2200-2400 m (22-24%) sono percorsi ad alta intensità (velocità di corsa maggiore di $15.0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), 850-950 m (8-9%) sono percorsi ad intensità molto alta (velocità di corsa maggiore di $19.8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) e 250-350 m (2-3%) sono coperti sprintando (velocità di corsa maggiore di $25.0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) (Rampinini *et al.*, 2007b). La tipologia di esercizio che i calciatori effettuano è intermittente, infatti i giocatori cambiano attività mediamente ogni 4-6 s arrivando ad effettuare, nel corso di una partita, circa 1300 diversi tipi di attività di cui circa 200 ad alta intensità (Mohr *et al.*, 2003). Oltre alle fasi di corsa, sono presenti numerose altre attività che tendono ad aumentare il dispendio energetico e l'impegno muscolare come ad esempio: i contrasti, i colpi di testa, le fasi di conduzioni del pallone, i lanci e i passaggi. Oltre a queste, ci sono anche fasi in cui i giocatori devono contendere il pallone all'avversario o devono mantenere l'equilibrio del proprio corpo nonostante gli sbilanciamenti subiti dagli altri giocatori. Inoltre, è anche importante sottolineare che, se negli anni settanta un calciatore di alto livello giocava nel corso di una stagione agonistica 40-50 partite ufficiali, attualmente i giocatori di alto livello affrontano 60-70 partite in un anno (Iaia *et al.*, 2009).

L'intensità media delle partite, in termini di percentuale del massimo consumo di ossigeno (VO_2max) è di 70-80% con una frequenza cardiaca media (in termini di percentuale della frequenza cardiaca massima, FCmax) di circa 85% (Helgerud *et al.*, 2001; Impellizzeri *et al.*, 2006). Data la natura intermittente dello sport, il contributo anaerobico è significativo nel corso delle fasi più intense del match (Krustrup *et al.*, 2006b); inoltre in particolari condizioni ambientali (caldo umide) tutti i meccanismi legati alla termoregolazione sono significativamente attivati (Mohr *et al.*, 2010). Infine, l'impegno muscolare che richiede il gioco del calcio (in particolare quello di tipo eccentrico) influenza

negativamente anche la capacità di sviluppare la massima forza e/o potenza. Questo elemento è una delle evidenze che conferma lo stato di fatica dei giocatori nel corso delle partite (Mohr *et al.*, 2005).

La fatica neuromuscolare

La fatica è una sensazione che tutti gli individui hanno sperimentato nel corso della propria esistenza. Secondo alcuni ricercatori, la fatica è comune a molti stati di malessere che includono infezioni, disordini metabolici, respiratori, mentali e cardiaci (Taylor and Gandevia, 2008). Questa sensazione può rendere più difficile lo svolgimento di un dato compito o può richiedere uno sforzo maggiore per risolverlo. Nell'adulto la fatica è il risultato di un'attività fisica ripetuta o di una vita quotidiana molto intensa, nell'atleta è fortemente influenzata dall'attività sportiva svolta.

Classicamente la fatica veniva definita come l'incapacità di produrre la massima forza da parte di un individuo (Edwards *et al.*, 1977) e veniva facilmente quantificata con il decremento nel picco di forza sviluppato in condizioni isometriche nel corso di una massima contrazione volontaria (MVC). Negli anni sono state proposte altre e più complete definizioni di fatica. Quella che meglio descrive lo stato in cui si vengono a trovare gli atleti nel corso delle diverse competizioni sembra essere: "fatica - riduzione acuta di performance che comprende sia un aumento della percezione dello sforzo nel produrre una determinata forza sia eventualmente un'incapacità di produrre questa stessa forza" (Barry and Enoka, 2007). Anche se il concetto di fatica è oggetto di studio da più di due secoli, le sue origini non sono state ancora del tutto chiarite. Nel corso di una contrazione muscolare volontaria sono numerosi gli eventi che si susseguono a cascata dall'invio del comando motorio da parte del sistema nervoso centrale sino alla contrazione delle fibre muscolari in periferia. L'insorgenza della fatica può avere origine in uno o più siti coinvolti in questo processo (Enoka and Duchateau, 2008).

La fatica neuromuscolare derivante da un particolare esercizio fisico può essere classificata secondo la sua origine: centrale o periferica (Gandevia, 2001). Viene definita come centrale quando la fatica ha avuto origine nel cervello o nel midollo spinale, periferica quando la stessa ha un'origine che risiede a valle della giunzione neuromuscolare (Gandevia, 2001). La fatica centrale è solitamente legata ad una ridotta efficienza del comando motorio centrale e può essere quantificata tramite l'utilizzo della tecnica della twitch interpolation technique. Infatti, l'utilizzo di questa tecnica consente la determinazione della massima attivazione volontaria di un muscolo da parte di un individuo e quindi consente di avere un indicatore indiretto di efficienza del comando motorio centrale (Allen *et al.*, 2008). La fatica centrale

può anche essere investigata tramite la raccolta del segnale elettromiografico (EMG) nel corso di una valutazione della MVC quale grossolano indicatore dell'entità del comando motorio centrale (Millet and Lepers, 2004). La fatica periferica invece, coinvolge principalmente una riduzione della trasmissione del potenziale d'azione e una ridotta efficienza del meccanismo di eccitazione-contrazione (Decorte *et al.*, 2010).

La fatica periferica può essere quantificata attraverso l'analisi della risposta meccanica o elettromiografia di un muscolo a seguito di una stimolazione elettrica o magnetica di un nervo periferico (e.g. estensori del ginocchio con stimolazione nervo femorale, flessori plantari con stimolazione nervo popliteo) (Verges *et al.*, 2009). La fatica periferica può a sua volta essere suddivisa in high-frequency fatigue (HFF) o low-frequency fatigue (LFF) (Allen *et al.*, 2008). Si parla di HFF quando un muscolo mostra una riduzione di forza utilizzando stimolazioni elettriche (o magnetiche) ad alta frequenza (> 50 Hz); questa tipologia di fatica si recupera in un tempo relativamente breve ed è spesso associata ad una riduzione della massima eccitabilità muscolare (quantificabile anche tramite la determinazione della M-wave) (Jones, 1996). E' generalmente legata a disturbi elettrolitici che si generano a seguito di esercizi svolti ad alta intensità come ad esempio l'accumulo di K^+ nello spazio interstiziale (Shushakov *et al.*, 2007). Si parla invece di LFF quando un muscolo mostra una riduzione di forza utilizzando stimolazioni elettriche (o magnetiche) a bassa frequenza (< 50 Hz); è definita anche long-lasting fatigue a causa del lento recupero che solitamente la caratterizza ed è principalmente legata ad una ridotta efficienza del meccanismo di eccitazione-contrazione. E' inoltre legata ad alterazioni dei processi di rilascio e riassorbimento del Ca^{2+} e/o ad una ridotta sensibilità delle fibre muscolari alla presenza di Ca^{2+} (Allen *et al.*, 2008). Questi meccanismi sono spesso associati alla fatica indotta dal lavoro di tipo eccentrico (Jones *et al.*, 1989). La fatica è specifica rispetto alla tipologia, alla durata e all'intensità dell'esercizio che si effettua (Millet and Lepers, 2004), tuttavia è stato dimostrato che la fatica di tipo centrale sembra essere più importante quando gli esercizi sono molto prolungati nel tempo. Al contrario, la fatica di tipo periferico sembra essere maggiormente importante quando gli esercizi sono relativamente brevi ma intensi (Taylor and Gandevia, 2008).

La fatica nel calcio

In uno sport in cui la performance deve essere mantenuta per un periodo di tempo lungo (i.e. 90 minuti), la fatica è rappresentata dall'incapacità dei giocatori di sostenere l'intensità richiesta per tutto

il tempo di esercizio. Nel calcio è possibile distinguere almeno tre tipologie di fatiche: quella di tipo transitorio che si genera a seguito delle fasi più impegnative del match, quella nella fase finale della partita e quella di tipo permanente ovvero quella che persiste nelle ore o nei giorni successivi al termine dell'incontro (Mohr *et al.*, 2005).

La fatica di tipo transitorio è quella che si genera a seguito delle fasi più intense della partita. Utilizzando i dati di time-motion-analysis è stato evidenziato che a seguito dei 5 minuti di partita in cui si è registrata la maggior quantità di lavoro ad alta intensità seguono sempre 5 minuti in cui il lavoro ad alta intensità è inferiore al valore medio del match (Mohr *et al.*, 2003; Bradley *et al.*, 2009). Se a questo si aggiunge che la capacità di effettuare sprint ripetuti risulta peggiorata dopo aver svolto un breve periodo di lavoro ad alta intensità (Krustrup *et al.*, 2006b) si può arrivare a concludere che i calciatori attraversano dei momenti di fatica transitoria durante la partita. Quali siano le cause di questa riduzione di performance non è ancora del tutto chiaro. Resta il fatto che, durante queste fasi, il meccanismo anaerobico risulta essere marcatamente attivato. Infatti, recentemente sono stati misurati livelli di lattato e di pH muscolare anche quattro volte superiori a quelli basali (Krustrup *et al.*, 2006b). L'acidità muscolare non è certamente l'unica causa che porta a fatica muscolare, tuttavia sono state individuate moderate correlazioni tra l'accumulo di lattato e il deterioramento della performance di sprint durante la partita. D'altra parte è noto che alti livelli di lattato e bassi livelli di pH interferiscono nella contrazione muscolare (Fitts, 1994). Altri possibili candidati per giustificare l'insorgenza della fatica di tipo transitorio potrebbero essere: la temporanea riduzione della concentrazione di fosfocreatina (CP) nel muscolo e l'accumulo di potassio nello spazio interstiziale (Bangsbo *et al.*, 1996). Infatti è noto che la supplementazione di creatina tende a migliorare la performance in esercizi di tipo intermittente (Greenhaff *et al.*, 1994). Inoltre la diminuzione di concentrazione di CP, a seguito di fasi ad alta intensità durante la partita, è correlata alla performance di sprint (Krustrup *et al.*, 2006b). Tuttavia, nel corso dell'attività specifica (partita), la riduzione di CP non sembra essere molto marcata (~25%) anche se bisogna considerare che i risultati ottenuti potrebbero essere stati influenzati dal tempo necessario per ottenere la misura di CP muscolare (~20 s) e che quindi potrebbe essersi già verificato un parziale ripristino della stessa. Quando si effettua un esercizio intenso e relativamente breve (alcuni minuti), si registra un marcato accumulo di potassio (K^+) nello spazio interstiziale (~ 12 mmol·l⁻¹). Un accumulo così elevato di K^+ induce un elevato disturbo elettrolitico; a sua volta, questa alterazione porta ad una depolarizzazione del potenziale della membrana muscolare e una conseguente riduzione della capacità

di produrre forza (Cairns and Dulhunty, 1995). L'accumulo di K^+ nello spazio interstiziale è certamente più marcato in presenza di un pH basso, quindi in sforzi dove è presente un grosso contributo del meccanismo anaerobico. Resta ancora da stabilire se tutti questi fattori o alcuni più di altri contribuiscano a un fenomeno che è però certamente presente: quello della fatica di tipo transitorio nel corso del match.

E' noto che la capacità di effettuare lavoro ad alta intensità da parte dei calciatori risulta diminuita nel corso del secondo tempo se confrontata con quella del primo (Bangsbo, 1994b; Mohr *et al.*, 2003). In particolare, la riduzione di performance nel secondo tempo sembra legata alla quantità di lavoro svolto ad alta intensità nel primo tempo (Rampinini *et al.*, 2007b). Ovviamente è molto più frequente assistere ad una riduzione della capacità prestativa quando già nel primo tempo è stata effettuata una grossa mole di lavoro. Al contrario, si può registrare anche un incremento del lavoro svolto ad alta intensità nel secondo tempo se la prima parte di partita è risultata essere meno impegnativa (Rampinini *et al.*, 2007b). La capacità di effettuare lavoro ad alta intensità risulta marcatamente diminuita nella fase finale della partita (Bangsbo, 1994c; Mohr *et al.*, 2003). Infatti, sia i calciatori di alto livello sia quelli di più basso livello, negli ultimi 15 minuti del match generalmente riducono la distanza percorsa ad alta intensità. Solo il 3% dei calciatori effettua molto lavoro ad alta intensità negli ultimi 15 minuti di gioco e ben il 40% copre la minor distanza ad alta intensità se si confrontano i sei quarti di gioco. Inoltre se si confronta la capacità prestativa dei sostituti con quella dei giocatori che hanno eseguito tutta la partita, la performance dei giocatori che effettuano solo una parte di gara risulta essere significativamente migliore (+63% gli sprint e +25% l'attività ad alta intensità). A conferma dei dati di match analysis viene il fatto che, utilizzando un test standardizzato, anche la capacità di effettuare sprint ripetuti è minore dopo la partita se comparata con una condizione basale (Krustrup *et al.*, 2006b). Una possibile causa per la riduzione di performance potrebbe essere la riduzione di glicogeno muscolare (Krustrup *et al.*, 2006b). Numerosi ricercatori si sono occupati di misurare la concentrazione di glicogeno muscolare prima, durante e dopo una partita. In uno studio è stato dimostrato come i calciatori vadano incontro a deplezione di glicogeno muscolare quando i livelli di partenza sono abbastanza bassi ($\sim 200 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$) (Saltin, 1973) e come si osservi comunque una notevole riduzione dello stesso (in particolare in alcune fibre muscolari) anche quando i giocatori iniziano la partita con le "scorte piene" (Krustrup *et al.*, 2006b). Altri fattori quali la disidratazione e l'ipertermia potrebbero contribuire all'insorgenza della fatica nella fase finale del match (Reilly, 1997). Mediamente i

calciatori perdono circa 3 litri di liquidi durante un incontro di calcio (Reilly, 1997). Occorre ricordare che con una perdita di soli 2 punti percentuali del peso corporeo di partenza, si registra un innalzamento della temperatura corporea e un conseguente aumento del carico cardio-vascolare (Hoffman *et al.*, 1994). Se a questo si aggiunge che a volte le partite vengono giocate in condizioni caldo-umide con una perdita di liquidi di 4-5 litri e che a volte si registra un notevole aumento della temperatura corporea (fino a ~40°C), appare evidente come l'insorgenza della fatica nella fase finale di una partita potrebbe avere un'origine centrale causata dall'inibizione di alcune funzioni cerebrali (Nybo and Nielsen, 2001).

Alcuni studi hanno riportato che la capacità prestativa dei giocatori resta ridotta per diverse ore o addirittura giorni dopo la partita confermando la presenza di fatica permanente. In due recenti ricerche effettuate su calciatori portoghesi e greci (Ascensao *et al.*, 2008; Ispirlidis *et al.*, 2008) è stato dimostrato che, a seguito di un incontro, la capacità di effettuare sprint può risultare ridotta anche del 10% per un periodo di tempo molto lungo (anche 72 ore). Come abbiamo visto nella parte introduttiva, anche il calo di forza è un elemento importante per definire lo stato di fatica. Alcuni ricercatori hanno utilizzato il test di forza massima (effettuato tramite l'esercizio dello squat o tramite macchinario isocinetico) per misurare il calo della stessa a seguito di una partita. Ascensao *et al.* (2008) hanno verificato che un match porta ad una riduzione della forza massima dal 5% al 12% per 72 ore, mentre nello studio di Ispirlidis *et al.* (2008) il calo di forza è stato del 9-14% anche in questo caso per 72 ore. Il livello di fitness dei giocatori e l'intensità della partita (parzialmente diversa da match a match) sono gli elementi principali che possono giustificare la variabilità di calo di performance nello sprint e la variabilità di riduzione di forza da studio a studio. Anche in questo caso le cause non sono state ancora definite con precisione; tuttavia la deplezione di glicogeno muscolare, il danno muscolare da esercizio, la risposta infiammatoria ed ormonale al lavoro svolto nel corso del match sono i maggiori candidati che possono spiegare questo fenomeno (Krustrup *et al.*, 2006b; Ascensao *et al.*, 2008; Ispirlidis *et al.*, 2008).

L'abilità di ripetere gli sprint

La capacità di ripetere sforzi massimali (sprint) o quasi intervallati da brevi periodi di recupero (Repeated-Sprint Ability, RSA) su un periodo di tempo lungo (1-4 ore) è una delle qualità fisiologiche più importanti per la performance fisica dei calciatori (Glaister, 2005; Spencer *et al.*, 2005; Impellizzeri

et al., 2008). Quando si parla di sprint è bene differenziare tra sprint intermittenti e sprint ripetuti. Nel caso degli sprint intermittenti si intendono quelle situazioni in cui sprint di breve durata (circa 10 secondi) si susseguono con un intervallo di tempo sufficientemente lungo a garantire un recupero completo o quasi (solitamente da 60 a 300 secondi) (Balsom *et al.*, 1992). Quando si parla invece di sprint ripetuti, gli sforzi (durata circa 10 secondi) sono intervallati da un tempo di recupero relativamente breve (< 60 secondi). Nel primo caso la performance negli sprint rimane praticamente invariata, nel secondo si osserva un marcato calo prestativo (Bishop and Spencer, 2004; Bishop and Claudius, 2005). Tale differenziazione è ritenuta di particolare rilevanza dato che i meccanismi che contribuiscono alla fatica risultano essere molto diversi tra le due situazioni. Inoltre, è bene ricordare che la fatica è determinata da una serie di fattori che vanno da quelli di tipo centrale (ad esempio l'incapacità del soggetto di inviare un comando motorio ottimale) a quelli di tipo periferico (ad esempio l'accumulo di metaboliti all'interno del muscolo).

I due indici più diffusi per la quantificazione della capacità di resistere alla fatica che si genera da una prova di sprint ripetuti sono l'indice di fatica (FI) e l'indice di decremento (DEC). Il FI è generalmente derivato dal calcolo del calo di performance tra lo sprint migliore (Best) e il peggiore (Worst) secondo la formula: $FI = 100 \times ((Best - Worst) / Best)$. Al contrario il DEC si basa sulla comparazione tra la reale performance effettuata nel test di sprint ripetuti e un'immaginaria performance ideale secondo la formula: $DEC = (1 - (S1 + S2 + S3 + \dots + Sfinal) / (Sbest \times \text{numero sprint})) \times 100$. Un possibile vantaggio dell'indice DEC rispetto a quello FI sta nel fatto che il primo indice prende in considerazione la performance di tutti gli sprint effettuati mentre il secondo utilizza per il calcolo solo la performance del migliore e del peggiore (solitamente il primo e l'ultimo). A conferma di questa ipotesi vengono i risultati di un recente studio, Glaister *et al.* (2008) hanno comparato otto diversi metodi per la quantificazione dell'indice di fatica nel corso di sprint ripetuti ed hanno concluso che l'indice DEC risulta essere il metodo più valido e ripetibile. Anche se gli indici di fatica sono un parametro utile per la quantificazione della performance di RSA, è importante ricordare che a seguito dei test di sprint ripetuti si possono calcolare altri indici comunque validi quali il lavoro totale svolto o (nel caso della corsa) il tempo medio. Questi indici dovrebbero essere usati assieme agli indici di quantificazione della fatica per meglio definire la capacità di sostenere sprint ripetuti. Infatti, è di primaria importanza cercare di contestualizzare gli indici di fatica che da soli non possono essere indicativi di una buona o cattiva capacità di effettuare sprint ripetuti (Racinais *et al.*, 2010).

Uno degli elementi più importanti che determina il calo di performance negli sprint ripetuti è la performance del primo sforzo massimale. Numerose ricerche hanno riportato una positiva correlazione tra la potenza o la velocità del primo sprint e l'entità del decremento di performance nel corso della prova (Bishop *et al.*, 2003; Mendez-Villanueva *et al.*, 2008a). Questo fenomeno potrebbe essere attribuito al fatto che gli atleti con una migliore performance nel primo sprint sono anche quelli che mostrano un maggior disturbo metabolico primariamente determinato da un maggior contributo anaerobico. Infatti, gli atleti con una minor riserva anaerobica sono anche quelli che mostrano indici di decremento di performance minori (Mendez-Villanueva *et al.*, 2008a). Non ci sono dubbi sul fatto che l'entità del calo di performance (decremento) nei test di sprint ripetuti è strettamente legata anche alla tipologia di esercizio che si utilizza. Il calo risulta essere generalmente maggiore quando si pedala (10-25%) rispetto a quando si corre (5-15%). Inoltre, il protocollo utilizzato (numero di sprint, durata degli sprint, durata e intensità del recupero) ha una forte influenza sui risultati. Ad esempio l'effettuazione di un recupero attivo invece che passivo induce un maggior decremento di performance (Spencer *et al.*, 2006; Buchheit *et al.*, 2009). Altri fattori quali il sesso degli atleti (Billaut and Bishop, 2009), l'età (Ratel *et al.*, 2006) e il livello di allenamento (Rampinini *et al.*, 2009) sembrano avere un'influenza significativa sul decremento di performance nel corso degli sprint ripetuti. In generale, le donne, i giovani e gli atleti più allenati dal punto di vista aerobico tendono ad avere cali di performance minori durante i test di RSA. Infine, il momento della giornata in cui si effettua il test (mattina o pomeriggio) sembra avere un effetto significativo sul decremento di performance negli sprint ripetuti (Racinais *et al.*, 2005) mentre non ha alcuna influenza sul lavoro totale svolto. Nel pomeriggio, la potenza muscolare del primo sprint risulta essere significativamente maggiore rispetto a quella della mattina mentre la performance nell'ultimo sprint risulta essere simile. Questa situazione potrebbe portare ad una cattiva interpretazione dei risultati del test di RSA dato che il decremento percentuale risulta essere maggiore nel pomeriggio. Tuttavia, il maggior calo è esclusivamente da attribuire ad una migliore performance nello sprint iniziale e non ad una peggiore condizione dell'atleta. Grande attenzione deve quindi essere prestata nell'interpretazione dei soli indici di fatica durante i test di RSA, se non vengono contestualizzati con altri valori come il lavoro totale e/o la performance iniziale potrebbero risultare fuorvianti.

Come accennato in precedenza l'evoluzione della fatica durante l'RSA è determinata da svariati fattori di tipo periferico. Tuttavia, cercando di semplificare, questi fattori periferici possono essere

raggruppati in due grandi famiglie: quelli di tipo muscolare e quelli di tipo nervoso. Quando si effettua un esercizio ad alta intensità si verifica un importante disturbo di tipo ionico all'interno del muscolo. In particolare, la pompa Na^+/K^+ non riesce a far riassorbire completamente il K^+ che si è accumulato all'esterno delle cellule muscolari. Questo fenomeno induce una riduzione dell'eccitabilità muscolare che a sua volta influenza negativamente l'efficacia della contrazione muscolare (Juel *et al.*, 2000). Utilizzando la stimolazione elettrica dei nervi periferici è possibile determinare il massimo potenziale d'azione muscolare tramite la misura della M-wave. Alcuni studi hanno confermato una riduzione dell'ampiezza massima della M-wave a seguito di un protocollo di sprint ripetuti (12 x 40 m, 30 secondi di recupero) (Perrey *et al.*, 2010). Questi risultati confermerebbero il fatto che, gli sprint ripetuti inducono una riduzione dell'eccitabilità muscolare. Tuttavia è bene ricordare che le evidenze presenti in letteratura non sono del tutto concordi (Racinais *et al.*, 2007). La disponibilità di energia utile per la contrazione muscolare sembra essere uno dei fattori che contribuisce al calo prestativo nel corso delle prove di RSA. La CP rappresenta la prima riserva di energia immediatamente pronta per la ricostituzione dell'adenosintrifosfato (ATP). Di conseguenza, le scorte di CP risultano essere molto importanti durante gli esercizi di RSA in cui è presente un elevato turnover di ATP. A tale proposito è molto utile ricordare che le scorte di CP si riducono del 50-60% dopo uno sprint di soli 6 secondi ed un suo completo ripristino potrebbe avvenire solo dopo alcuni minuti (Dawson *et al.*, 1997). Inoltre, la riduzione di CP è più marcata nelle fibre veloci che sono anche quelle che consentono un maggior sviluppo di potenza. La selettiva deplezione di CP nelle fibre veloci potrebbe essere quindi uno dei fattori che contribuisce al decadimento della prestazione nel corso di sprint ripetuti (Sahlin and Ren, 1989). Per quanto riguarda invece la glicolisi anaerobica, è noto che questo meccanismo energetico fornisce circa il 40% dell'energia totale nel corso di un singolo sprint di 6 secondi. Questa percentuale tende però a diminuire quando gli sprint vengono ripetuti, dato che si verifica un'inibizione dell'efficienza glicolitica (Gaitanos *et al.*, 1993). Per fare un esempio, è stata riportata una riduzione della glicolisi anaerobica di circa 8 volte confrontando il primo e l'ultimo sprint in un protocollo che prevedeva 10 x 6 secondi con 30 secondi di recupero. Da ultimo, è ben noto che il contributo del metabolismo ossidativo nel corso di uno sprint singolo è certamente molto limitato (<10%). Tuttavia questa percentuale tende ad aumentare man mano che gli sprint si ripetono arrivando anche al 40% dell'energia totale nell'ultimo sprint in un esercizio di RSA che prevedeva 5 x 6 secondi con 30 secondi di recupero (McGawley and Bishop, 2008). Inoltre bisogna considerare che gli atleti possono

raggiungere livelli di consumo di O₂ simili a quelli del proprio VO₂max nel corso degli ultimi sprint in prove di RSA. Questo fenomeno potrebbe suggerire che il contributo aerobico in questa tipologia di prove è limitato anche dai valori individuali di VO₂max (McGawley and Bishop, 2008). L'accumulo di metaboliti a livello muscolare potrebbe essere un'altra delle cause principali dell'insorgenza di fatica. E' stato suggerito che il considerevole aumento della concentrazione di idrogenioni a livello muscolare ed ematico potrebbe influenzare negativamente la performance di RSA a causa dell'azione inibitoria svolta sulla glicolisi anaerobica. A supporto di questa ipotesi, alcuni ricercatori hanno riportato una correlazione significativa tra le capacità tampone muscolari e i cambiamenti di pH a livello ematico e/o la performance di RSA (Bishop *et al.*, 2004b; Bishop and Edge, 2006). E' ben noto che la forza periferica dei flessori plantari è significativamente ridotta dopo un test di RSA (Perrey *et al.*, 2010). Questa ridotta funzionalità periferica è correlata ad una minor efficienza del ciclo di rilascio riassorbimento del Ca²⁺ a livello del reticolo sarcoplasmatico che a sua volta potrebbe essere determinata da un marcato accumulo di fosfato inorganico a livello muscolare (Westerblad *et al.*, 2002).

Gli sprint massimali necessitano di essere supportati da un comando motorio centrale ottimale dato che sarebbe opportuno riuscire ad attivare completamente i muscoli coinvolti nell'esercizio per tutta la durata dello stesso. Quando durante un test di RSA si osserva un affaticamento moderato (FI < 10%), è abbastanza normale verificare che l'attivazione neuronale rimane ottimale per tutta la durata del test (Perrey *et al.*, 2010). Quando invece l'affaticamento è elevato (FI > 15%), ci sono evidenze che supportano il fatto che il comando motorio a livello centrale non rimane allo stesso livello in tutti gli sprint (Mendez-Villanueva *et al.*, 2008b). Di conseguenza la fatica che si genera durante gli esercizi di RSA sembra essere determinata sia da fattori di tipo muscolare periferico che da fattori di tipo centrale. Il coinvolgimento di fattori di tipo centrale allarga l'orizzonte ad altre possibili conseguenze di questo imperfetto funzionamento del sistema nervoso. Infatti, la fatica di tipo centrale potrebbe influenzare anche il controllo senso motorio e la capacità di modulazione della forza portando ad un peggioramento delle abilità sport specifiche ma anche ad un potenziale aumento del rischio di infortuni. L'inibizione a livello centrale potrebbe essere il risultato di informazioni afferenti derivanti dall'apparato muscolo-tendineo (fusi muscolari, organi del Golgi, afferenze di piccolo diametro gruppo III e IV). Ad esempio l'accumulo muscolare di metaboliti potrebbe stimolare questo particolare feedback inibitorio (Sinoway *et al.*, 1993). In alternativa, la ridotta efficienza a livello centrale potrebbe essere legata ad una parziale

de-saturazione di O₂ a livello arterioso con conseguente riduzione di efficienza cerebrale (Billaut and Smith, 2010). Un altro fattore di tipo nervoso che potrebbe contribuire alla fatica durante esercizi di RSA è la possibile modifica delle strategie di reclutamento muscolare. Ad esempio il timing di attivazione agonisti/antagonisti risulta essere alterato (Billaut *et al.*, 2005) e molto probabilmente risulta alterata anche la coordinazione intermuscolare.

Ci sono altri fattori che potrebbero contribuire all'instaurarsi della fatica durante i test di RSA. Alcune evidenze che suggeriscono che un cambio di stiffness muscolare possa aumentare il livello di fatica cui gli atleti incorrono (Ross *et al.*, 2001). La stiffness influenza positivamente la capacità del muscolo di produrre forza durante la fase concentrica dato che aumenta il riutilizzo di energia elastica. Questo potrebbe essere il motivo per cui si osserva generalmente una riduzione della frequenza del passo quando gli atleti effettuano prove di sprint ripetuti. Infine, anche le condizioni ambientali giocano un ruolo importante nell'instaurarsi o meno di elevati livelli di affaticamento durante le prove di RSA. Gli ambienti caldo umidi e l'altitudine sembrano essere due fattori ambientali che aumentano il grado di fatica (Hogan *et al.*, 1999; Drust *et al.*, 2005).

Scopo

L'obiettivo del presente lavoro sarà indagare gli aspetti centrali e periferici della fatica specifica nel gioco del calcio. Nel capitolo 2 verrà analizzata la fatica permanente indotta da una partita di calcio cercando di chiarire l'influenza dei vari meccanismi fisiologici collegati a questo fenomeno. Nello stesso capitolo, si cercherà di investigare le variabili che contribuiscono alla qualità del recupero post-gara elemento fondamentale per la prestazione ottimale del giocatore nel calcio moderno. Nel capitolo 3, si cercherà di verificare le eventuali relazioni esistenti tra insorgenza della fatica nel corso degli incontri e frequenza di realizzazione dei goal realizzati. Nel capitolo 4, verranno indagate le specificità della fatica neuromuscolare periferica indotta da un esercizio di RSA. Si evidenzieranno le peculiarità della fatica periferica indotta da un esercizio di RSA eseguito correndo confrontandolo con un esercizio di RSA eseguito pedalando. Inoltre, dopo aver determinato l'affidabilità metodologica della tecnica per la quantificazione della fatica neuromuscolare periferica indotta da un esercizio di corsa intermittente ad alta intensità con uno studio di ripetibilità (capitolo 5), verranno quantificate le variazioni stagionali (capitolo 6) della fatica periferica indotta da questa particolare tipologia di esercizio (fatica transitoria) in due gruppi di calciatori professionisti (adulti e giovani). Infine, nel capitolo 7 verranno riepilogati i

risultati dei diversi studi condotti in questo lavoro cercando di evidenziare le applicazioni pratiche, i limiti legati ai vari studi e i possibili spunti di riflessione utili per ricerche future.

Capitolo 2

LA FATICA INDOTTA DA UNA PARTITA DI CALCIO

Introduzione

Il calcio è uno sport di squadra che richiede ai giocatori la capacità di sostenere sforzi intermittenti ad alta intensità (Mohr *et al.*, 2003). Nel corso di una partita, i calciatori cambiano attività mediamente ogni 5 s ed effettuano circa 1300 diversi tipi di attività. Di queste circa 200 sono fatte ad alta intensità (Mohr *et al.*, 2003). Oltre alle fasi di corsa, i giocatori devono effettuare altre tipologie di attività che richiedono lo sviluppo di buoni livelli di forza quali: cambi di direzione, dribbling, contrasti o salti.

La fatica può essere definita come un acuto peggioramento della prestazione che include sia un aumento della percezione dello sforzo nel produrre una determinata forza /o potenza sia eventualmente una riduzione della capacità di sviluppare la massima forza e/o potenza (Gandevia, 2001). Recenti studi hanno dimostrato che i giocatori incorrono in una fatica di tipo transitorio nel corso del match oltre che ad una fatica di tipo permanente che si manifesta nelle fasi finali di un incontro o nelle ore/giorni successivi ad esso (Mohr *et al.*, 2005). Infatti, grazie all'utilizzo delle tecniche di video analisi computerizzate, è stato riportato che la distanza totale (TD) e la distanza percorsa alta intensità sono ridotte a seguito dei 5 minuti di partita maggiormente intensi (Mohr *et al.*, 2003) e sono ridotte anche nel secondo rispetto al primo tempo (in particolare negli ultimi 15 minuti di gioco) (Mohr *et al.*, 2003; Rampinini *et al.*, 2007b). Inoltre, la forza massima, la capacità di salto e di sprint sono significativamente ridotte a seguito della partita (Krustrup *et al.*, 2006b; Andersson *et al.*, 2008; Ascensao *et al.*, 2008; Ispirlidis *et al.*, 2008; Thorlund *et al.*, 2009). Il tempo necessario per recuperare completamente queste qualità è a volte molto lungo (più di 72 ore) (Ascensao *et al.*, 2008; Ispirlidis *et al.*, 2008). Tuttavia, le informazioni relative al tempo di recupero sono state raccolte su giocatori amatori o di basso livello e le cinetiche di recupero negli atleti professionisti di alto livello non sono state ancora chiarite. La fatica determinata da una partita di calcio può avere un effetto negativo anche sull'abilità di effettuare con precisione un passaggio (Rampinini *et al.*, 2008), tuttavia ancora una volta le informazioni raccolte non sono relative ai giocatori top level.

E' stato dimostrato che la fatica neuromuscolare che contribuisce al calo prestativo è specifica rispetto alla tipologia, alla durata e all'intensità dell'esercizio svolto (Millet and Lepers, 2004). La fatica può essere classificata come centrale o periferica a seconda della sua origine (Gandevia, 2001). E' definita come centrale quando la fatica ha origine prossimalmente rispetto alla giunzione neuromuscolare e periferica quando la sua origine è distale rispetto alla giunzione stessa (Gandevia, 2001). Tuttavia, ad oggi nessuno studio ha quantificato il contributo dei fattori centrali e di quelli

periferici nella determinazione della fatica indotta da una partita di calcio. La funzionalità neuromuscolare periferica di un muscolo può essere determinata utilizzando stimolazioni elettriche dei nervi periferici. La quantificazione della fatica di lunga durata (long-lasting fatigue) prevede l'utilizzo di stimolazioni tetaniche dei nervi a diverse frequenze (rapporto tra la forza sviluppata con stimolazioni a bassa frequenza rispetto a quella sviluppata con stimolazioni ad alta frequenza) (Edwards *et al.*, 1977). Tuttavia, le stimolazioni tetaniche sono molto dolorose e il loro utilizzo in ambito sportivo molto limitato (Verges *et al.*, 2009). Recentemente, è stato proposto l'utilizzo di coppie di stimoli (a bassa o ad alta frequenza) come surrogato dei treni di impulsi (Amann *et al.*, 2006) ed è stato dimostrato che questa tecnica è una tecnica valida per la quantificazione della fatica muscolare periferica indotta da un esercizio di tipo eccentrico (Verges *et al.*, 2009).

I meccanismi fisiologici responsabili dell'insorgenza della fatica indotta da una partita non sono stati ancora del tutto chiariti. La riduzione di forza massima, l'aumento della sensazione di dolenzia muscolare e l'aumento dei livelli di creatinchinasi (CK) nel circolo sanguigno sembrano suggerire che, almeno in parte, il calo prestativo potrebbe essere legato al danno muscolare generato dall'esercizio (Ascensao *et al.*, 2008; Ispirlidis *et al.*, 2008). Tuttavia, la fatica muscolare potrebbe avere origine anche a livello spinale e/o soprasspinale (Gandevia, 2001). In un recente studio effettuato su uno sport intermittente come il tennis (Girard and Millet, 2009), è stato dimostrato che sia i fattori centrali sia quelli periferici sono responsabili del calo di forza che si genera dopo la partita. Inoltre, oltre ad influenzare negativamente la massima performance muscolare, la fatica potrebbe avere degli effetti negativi anche sulle abilità tecniche (Rampinini *et al.*, 2008). Infatti, è stato dimostrato che la fatica indotta da un esercizio eccentrico altera anche la propriocezione degli arti nello spazio e la capacità di modulazione della forza (Gandevia, 2001). Tuttavia, le informazioni relative all'effetto della fatica muscolare sulle abilità tecniche del calciatore sono limitate.

Quindi, gli scopi del presente studio sono stati: 1) determinare l'andamento di alcuni parametri neuromuscolari (massima contrazione volontaria (MVC), massima attivazione volontaria, proprietà contrattili del muscolo quadricipite, abilità di sprint e di passaggio breve), della dolenzia muscolare e del CK a seguito di una partita di calcio in giocatori professionisti; 2) verificare il contributo dei fattori centrali e di quelli periferici alla fatica determinata dal match. L'ipotesi su cui si è basato lo studio è che l'andamento dei parametri analizzati è diverso negli atleti professionisti rispetto a quanto precedentemente riportato per gli atleti di più basso livello e che la fatica determinata da una partita di

calcio è il risultato della combinazione di fattori di tipo centrale e di tipo periferico.

Materiali e Metodi

Soggetti

Ventidue giovani calciatori professionisti maschi appartenenti ad una squadra di serie A italiana (due portieri, otto difensori, otto centrocampisti e quattro attaccanti; età = 19 ± 1 anni, peso $73,0 \pm 7,0$ kg, altezza 181 ± 5 cm) sono stati coinvolti nello studio. I giocatori si allenavano mediamente sei volte più una partita ufficiale in ogni settimana. Due difensori e un centrocampista non hanno completato tutte le valutazioni previste dallo studio e per questo sono stati esclusi dall'analisi finale. Anche i due portieri non sono stati inclusi nell'analisi finale a causa della differente tipologia di esercizio sostenuta nel corso della partita. Prima dell'inizio dello studio, tutti i soggetti hanno firmato il consenso informato di partecipazione alla ricerca. Lo studio è stato approvato dall'Institutional Review Board del centro ricerche per lo sport Mapei di Olgiate Olona.

Disegno Sperimentale

Per questo studio è stato utilizzato un quasiexperimental control period design, il quale è stato condotto durante il periodo competitivo. Prima di iniziare lo studio, i soggetti sono stati familiarizzati con tutte le valutazioni e le procedure. Nel periodo di controllo, i partecipanti hanno effettuato la valutazione neuromuscolare, il Loughborough Soccer Passing Test (LSPT) a un test di sprint in due sessioni distinte separate da una settimana (PRE1 e PRE2). Le due sessioni di test preliminari sono servite per determinare la ripetibilità di tutte le variabili calcolando il coefficiente di correlazione di intraclassa 1,2 (ICC) e l'errore tipico della misura (TE) espresso come coefficiente di variazione (CV). Dopo il periodo di controllo, i giocatori hanno disputato una partita amichevole di 90 minuti (due tempi da 45 minuti con 15 minuti di intervallo) su un terreno in erba artificiale. Quaranta minuti dopo (POST), 24 ore (POST24) e 48 ore (POST48) dopo la fine della partita, i partecipanti hanno ripetuto tutte le valutazioni nello stesso ordine utilizzato nel corso delle valutazioni preliminari. I giocatori non hanno effettuato alcun tipo di attività nelle 48 ore che precedevano le sessioni di valutazione ad esclusione della partita disputata tra PRE2 e POST. La partita e le valutazioni sono state effettuate nel pomeriggio ad una temperatura ambiente di 16-19 C° e un'umidità relativa di 40-50%. Al fine di limitare l'influenza dell'alimentazione sui risultati dei test, ai giocatori è stato chiesto di seguire un preciso regime alimentare che prevedeva un adeguato apporto di carboidrati (50-60% dell'energia

totale assunta). Nel corso della partita ai giocatori era consentito per *ad libitum*. Il protocollo di valutazione utilizzato in ogni sessione è riportato nella figura 1. Dopo il riscaldamento (5 minuti a 8-10 km·h⁻¹), i soggetti hanno effettuato i test di efficienza neuromuscolare periferica, il test di MVC in condizioni isometriche con determinazione della massima attivazione volontaria, il LSPT e il test di sprint.

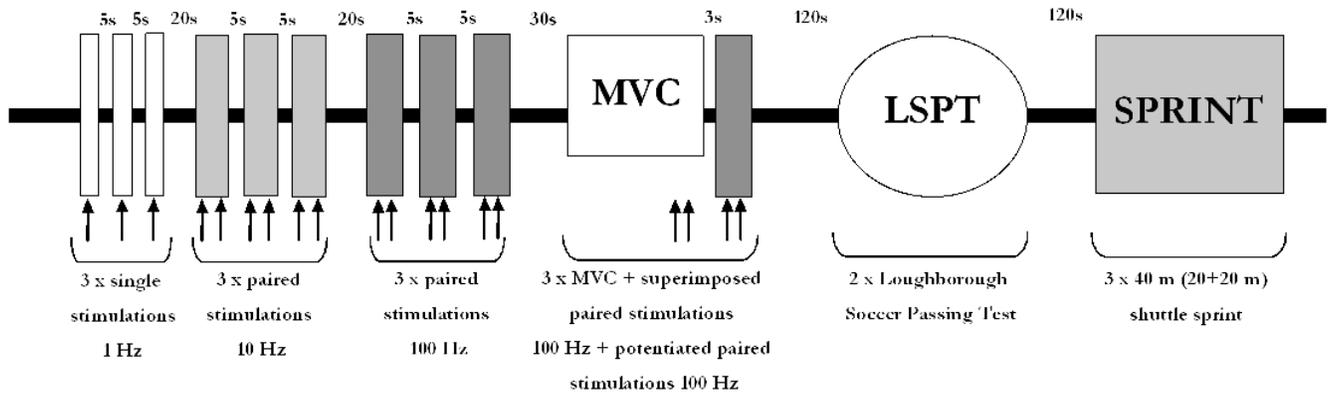


Figura 1. Rappresentazione schematica del protocollo utilizzato in ogni sessione di valutazione. MVC, massima contrazione volontaria; LSPT, Loughborough Soccer Passing Test.

Misura della funzionalità contrattile del muscolo

Tutte le misurazioni della funzionalità contrattile del muscolo sono state effettuate sugli estensori del ginocchio (KE) della gamba destra con i soggetti seduti in condizioni isometriche su una leg extension. L'angolo al ginocchio e all'anca era fisso a 90° (0° = gamba completamente distesa) e sono state utilizzate delle cinture di Velcro per minimizzare i movimenti. Ai soggetti è stato anche raccomandato di impugnare delle apposite maniglie attaccate alla seduta nel corso delle contrazioni al fine di ottenere una stabilizzazione ancora migliore. La risposta meccanica del muscolo è stata misurata utilizzando una cella di carico (AIP, Varese, Italia) collegata ad un sistema di acquisizione di segnali (BIOPAC MP100; BIOPAC Systema Inc, Santa Barbara, CA) con una frequenza di campionamento di 125 Hz. La cella di carico è stata calibrata utilizzando dei pesi di riferimento certificati. La misurazione della funzionalità contrattile del KE includeva la MVC (ICC = 0,94, TE come CV = 6,1%), la massima attivazione volontaria (%VA) (ICC = 0,72, TE come CV = 4,2%) e misurazioni della forza periferica del muscolo tramite stimolazioni elettriche. I partecipanti hanno sostenuto tre MVC utilizzando il

miglior risultato per l'analisi statistica. La %VA dei KE è stata calcolata utilizzando la tecnica della twitch interpolated technique. Una coppia di stimoli ad alta frequenza (10 ms di intervallo) sono stati sovrainposti al plateau nel corso del test di MVC. Successivamente è stata calcolata la %VA utilizzando il rapporto tra l'entità della doppietta sovrainposta e l'entità della doppietta ottenuta sul muscolo rilassato: $\%VA = (1 - \text{doppietta sovrainposta} / \text{doppietta su muscolo rilassato}) \times 100$. La doppietta ottenuta sul muscolo rilassato era una doppietta potenziata dato che era ottenuta 4 s dopo la fine della MVC.

Gli stimoli elettrici singoli (1 Hz) e le coppie (10 Hz con 100 ms di intervallo e 100 Hz con 10 ms di intervallo) erano prodotti tramite un impulso ad onda quadra (200 μ s) utilizzando uno stimolatore di corrente costante ad alto voltaggio (Digitimer DS7AH; Hertfordshire, UK). Il nervo femorale è stato stimolato utilizzando un catodo monopolare posizionato nel triangolo femorale e un anodo posizionato sulla linea del gluteo. Per limitare l'influenza del ri-posizionamento degli elettrodi, nel corso della prima sessione di test (PRE1) la posizione degli stessi è stata marcata sulla pelle tramite l'utilizzo di un pennarello indelebile. L'amperaggio è stato progressivamente aumentato di 10 mA fino a quando non è stata osservata un ulteriore aumento del picco di momento di forza determinato dalla twitch (il più alto valore del picco di momento di forza per KE) e un concomitante ulteriore aumento dell'ampiezza della M-wave (peak-to-peak amplitude, PPA). L'intensità è stata successivamente aumentata del 20% e successivamente mantenuta costante nel corso dell'intera sessione di test (media amperaggio 180 ± 42 mA, range = 120-252 mA). All'inizio di ogni sessione di test l'amperaggio ottimale è stato ri-determinato.

I parametri che sono stati calcolati dalla risposta meccanica del muscolo attraverso le stimolazioni elettriche singole e doppie erano: Picco del momento di forza (PT) (ICC = 0,97-0,98, TE come CV = 2,3-2,8%), Maximal Rate of Torque Development (MRTD) (ICC = 0,96-0,97, TE come CV = 3,3-3,6%) valore più elevato della derivata prima del segnale di momento di forza espresso, Maximal Rate of Torque Relaxation (MRTR) (ICC = 0,93-0,95, TE come CV = 3,4-4,9%) valore più basso della derivata prima del segnale di momento di forza espresso, Contraction Time (CT) (ICC = 0,87-0,95, TE come CV = 3,4-4,1%) tempo tra l'origine del segnale meccanico e il PT e il rapporto tra il PT a 10 Hz e il PT a 100 Hz (ICC = 0,97, TE come CV = 2,0%).

Il segnale elettromiografico

Il segnale EMG del vasto laterale (VL) dell'arto destro è stato registrato utilizzando degli

elettrodi bipolari nel corso del test di MVC e nel corso delle stimolazioni elettriche. Gli elettrodi erano posizionati al centro del ventre muscolare con una distanza tra i due di 20 mm. La posizione degli elettrodi era stata segnata sulla pelle nel corso della sessione PRE1 al fine di riposizionarli nella stessa posizione nel corso delle altre sessioni. L'elettrodo di riferimento era posizionato sulla patella. L'impedenza tra i due elettrodi era bassa ($< 5k\Omega$) dato che la pelle era stata preventivamente pulita con carta abrasiva ed alcol. Il segnale EMG era amplificato (gain = 1200), filtrato (frequenza di banda = 10-500 Hz) e registrata (frequenza di campionamento = 2000 Hz) tramite specifico hardware (PocketEMG; BTS S.p.A., Garbagnate Milanese, Italia) e software (Analyzer 1.10.427; BTS S.p.A., Garbagnate Milanese, Italia). La PPA (ICC = 0,79, TE come CV = 12,6%) e la peak-to-peak duration (ICC = 0,76, TE come CV = 10,9%) della M-wave è stata determinata utilizzando delle twitch singole. Inoltre, il root mean square (RMS) è stato calcolato su un intervallo di 0,5 s durante il test di MVC dopo aver raggiunto il plateau ma prima dell'invio della stimolazione elettrica sovrainposta (ICC = 0,71, TE come CV = 13,5%). I valori di RMS erano anche normalizzati utilizzando il valore di PPA della M-wave (ICC = 0,92, TE come CV = 10,1%). Una riduzione del RMS durante il test di MVC senza una concomitante riduzione della PPA, può essere interpretata come una riduzione di efficienza dell'attivazione muscolare a livello centrale (Millet and Lepers, 2004).

Il test di sprint

Il test di sprint è stato effettuato su una distanza di 40 m coprendo due tratti di 20 m a navetta (Rampinini *et al.*, 2007a). Lo scopo di questo test era quello di misurare sia la velocità che l'abilità di cambiare direzione da parte dei giocatori. Gli atleti partivano da una linea, sprintavano per 20 m, toccavano un cono con una mano e poi tornavano alla linea di partenza nel minor tempo possibile. Il tempo di sprint veniva misurato utilizzando un sistema di fotocellule (Microgate, Bolzano, Italia) e venivano calcolati 4 indici: tempo necessario per coprire l'intera distanza (40 m, SPR_{40m}) (ICC = 0,94, TE come CV = 0,7%), tempo necessario per effettuare la fase di accelerazione (tra 0 e 15 m, SPR_{acp}) (ICC = 0,89, TE come CV = 1,2%), tempo necessario per effettuare il cambio di direzione (tra 15 e 25 m, SPR_{dcp}) (ICC = 0,89, TE come CV = 1,2%) e il tempo necessario per completare la fase lanciata (tra 25 e 40 m, SPR_{flp}) (ICC = 0,89, TE come CV = 1,3%). Dopo alcune prove sub massimali, la migliore di tre prove massimali è stata utilizzata per l'analisi statistica.

Il test di passaggio (Loughborough Soccer Passing Test)

Per quantificare l'abilità di effettuare passaggi corti da parte dei calciatori, è stata utilizzata la

prima versione del test LSPT (Ali *et al.*, 2003). Questa versione del test è stata dimostrata essere valida e ripetibile per la quantificazione dell'abilità di effettuare passaggi corti da parte dei giocatori (Ali *et al.*, 2003). La rappresentazione schematica del percorso utilizzato nel test è riportata nella figura 2. Il test consisteva nell'esecuzione di 16 passaggi in senso orario effettuati all'interno di un percorso di coni nella maniera più rapida e precisa possibile. Quattro target della dimensione di 30 x 60 cm (due gialli e due blu) e uno di dimensione 30 x 10 cm (porpora) erano posizionati su un bersaglio di legno (30 x 250 cm). I soggetti partivano con la palla dalla central box e, dopo il segnale dell'operatore, gli stessi dovevano condurre la palla nella passing area, effettuare il passaggio verso il target A, riprendere il controllo della palla, ritornare con la stessa nel central box per poi muoversi in direzione del target B con le stesse modalità. Quindi, prima di effettuare il passaggio successivo nella zona passing area, la palla doveva essere condotta all'interno del central box. A seconda degli errori commessi dai giocatori erano previste le seguenti penalità:

- 5 s per aver completamente mancato un bersaglio o per aver colpito con la palla il bersaglio sbagliato
- 3 s per aver colpito il bersaglio di legno ma aver mancato i target colorati (e.g. aver colpito uno spigolo del bersaglio di legno)
- 2 s per aver colpito il target giallo
- 1 s per aver colpito il target blu
- 2 s per aver effettuato il passaggio all'esterno della passing area
- 2 s se la palla toccava un cono
- 1 s per ogni secondo in più oltre i 43 pre-stabiliti utili per completare il test.

Al contrario, per ogni passaggio perfetto effettuato colpendo il target porpora veniva sottratto 1 s dal tempo totale. Gli indici di performance erano tre: il tempo totale necessario per completare i 16 passaggi e ritornare al central box (LSPT time) (ICC = 0,98, TE come CV = 2,3%), le penalità accumulate (LSPT penalties) (ICC = 0,75, TE come CV = 30,8%) e la somma di questi primi due indici come indicatore di performance totale (LSPT total) (ICC = 0,85, TE come CV = 3,7%). Prima dell'inizio della prova, i soggetti avevano effettuato due prove sottomassimali e per l'analisi statistica è stata utilizzata la migliore delle due prove massimali effettuate. Al termine della prova è stata anche raccolta la sensazione dello sforzo (RPE) tramite l'utilizzo della scala di Borg CR10 (Borg, 1998).

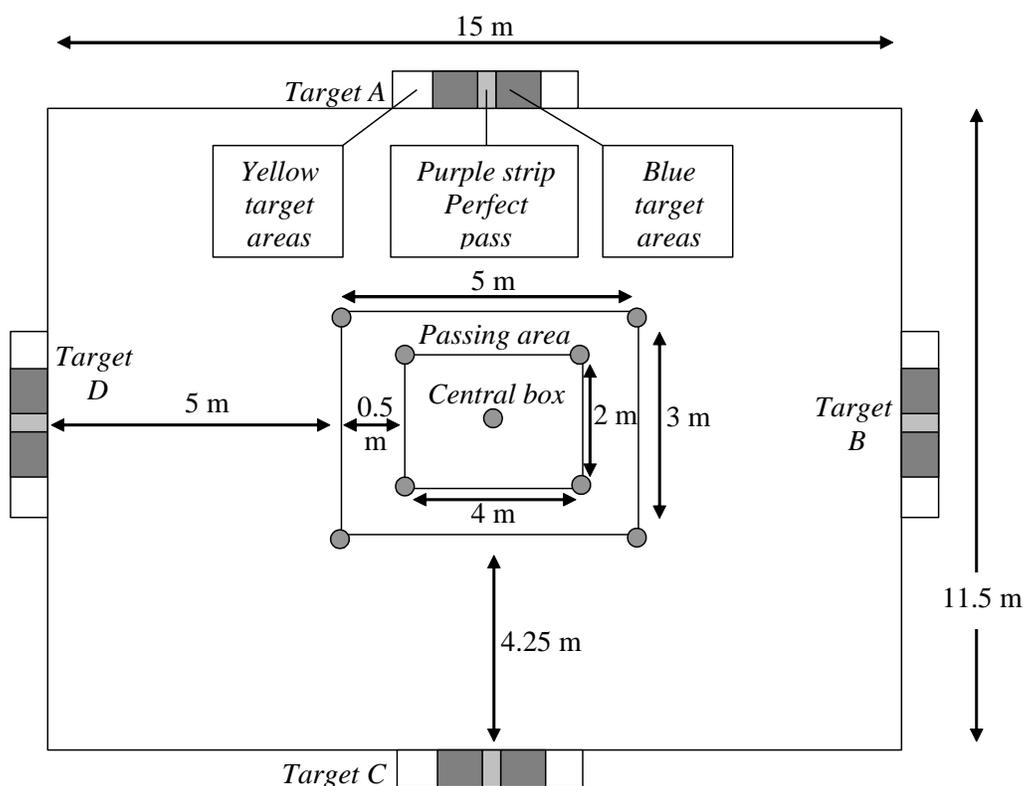


Figura 2. Rappresentazione schematica del percorso utilizzato per effettuare il Loughborough Soccer Passing Test.

La performance fisica nel corso della partita

La partita è stata monitorata utilizzando un sistema di analisi video semi-automatico (Wisport, Genova, Italia). Questo sistema comprendeva l'utilizzo di più videocamere per monitorare contemporaneamente l'attività dei 22 giocatori. I parametri presi in esami erano la distanza totale (TD) e la distanza percorsa ad alta intensità (HIR, distanza percorsa con una velocità di corsa $> 15 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$). Nel corso della partita è stata monitorata anche la frequenza cardiaca degli atleti (HR) e alla fine del match è stata raccolta anche la RPE utilizzando la scala di Borg CR10 (Borg, 1998).

La percezione del dolore muscolare

La percezione di dolore muscolare è stata determinata tramite l'utilizzo di una visual analog scale (VAS) che riportava ai due estremi le descrizioni "nessun dolore" e "dolore insopportabile". Ai soggetti veniva richiesto di riportare sulla scala lunga 10 cm un segno in corrispondenza del livello di dolore muscolare percepito. Il dolore muscolare è stato determinato due volte prima della partita (PRE1

e PRE2) (ICC = 0,65, TE come CV = 18,5%) e tre volte dopo la stessa (POST, POST24 e POST48).

Paramteri biochimici

I campioni di sangue venivano raccolti in specifiche provette (Vacutainer, BD Diagnostics, Franklin Lakes, NJ) che venivano centrifugate per separare il siero dalla parte corpuscolare. Il siero veniva congelato a -20°C prima delle analisi. La concentrazione di creatichinasi (CK) è stata determinata utilizzando un sistema automatico Aeroset (Abbott Diagnostics, Chicago, IL) con specifici reagenti.

Analisi statistica

Tutti i dati vengono riportati come media \pm SD. Per ogni variabile dipendente è stata utilizzata l'ANOVA ad una via per misure ripetute per stabilire le differenze nel corso dello studio (PRE1, PRE2, POST, POST24 e POST48). Dato che l'assunzione di sfericità è stata violata per alcune variabili, è stata utilizzata la tecnica multivariata per limitare la possibilità di incorrere in errori di tipo I (Thomas and Nelson, 2005). Quando è stato trovato un valore di F significativo, è stato applicato il test di Fisher LSD come *post hoc*. Come indicatore di effect size, sono stati calcolati i valori di eta squared parziali ($\rho\eta^2$) per l'ANOVA, e valori di 0,01, 0,06 e sopra 0,15 sono stati considerati effect size small, medium e large (Cohen, 1988). Le differenze tra primo e secondo tempo nell'intensità di esercizio (media e picco di HR) o nella performance fisica (TD e HIR) sono state analizzate tramite il test di Student t -test. Il coefficiente di correlazione di Pearson r è stato utilizzato per verificare le relazioni esistenti tra i cambiamenti POST vs PRE2 degli indicatori di fatica centrale (%VA e MVC RMS/PPA) o gli indicatori di fatica periferica (PT a 1, 10 e 100 Hz) e l'intensità di esercizio nel corso del match, i cambiamenti nel picco di momento di forza durante la MVC, la performance di sprint, l'abilità di passaggio e la percezione di dolore muscolare. E' stato assunto un livello di significatività di $P < 0,05$.

Risultati

La performance fisica nel corso della partita

La TD e la HIR percorsa durante la partita erano 11764 ± 1044 m e 2664 ± 772 m. La TD e la HIR si sono ridotte significativamente tra primo e secondo tempo (TD, -10,3%, $P < 0,001$ e HIR, -14,9%, $P = 0,017$). La HR media è stata pari a 175 ± 9 bpm mentre il picco di HR è stato pari a 192 ± 7 bpm. In termini di percentuale della massima la HR media è stata di $88,0 \pm 4,1\%$ mentre il picco di HR è stato $96,3 \pm 2,8\%$. Nel corso del secondo tempo gli stessi parametri sono risultati essere

significativamente ridotti (HR media = 164 ± 8 bpm, $82,5 \pm 4,0\%$ della HR massima, $P < 0,001$; picco di HR = 190 ± 7 bpm, $95,1 \pm 3,0\%$ della HR massima). La RPE riportata dagli atleti è stata di $7,5 \pm 1,1$ au.

Massima contrazione ed attivazione volontaria

L'analisi statistica ha individuato una variazione significativa per la KE MVC ($P < 0,001$, $\rho\eta^2 = 0,39$) e per la %VA ($P < 0,001$, $\rho\eta^2 = 0,45$) (figura 3). Il picco del momento di forza è risultato essere ~11% inferiore nel corso della sessione POST rispetto alle sessioni PRE1 e PRE2 ($P < 0,001$). Il picco del momento di forza è risultato essere solo parzialmente recuperato 24 ore dopo il match (vs POST = $+6,8\%$, $P = 0,017$; vs PRE1 = $-5,7\%$, $P < 0,001$ e vs PRE2 = $-5,0\%$, $P < 0,001$) ma è risultato simile ai valori basali prima della partita 48 ore dopo il match ($P = 0,233$). Allo stesso modo, la %VA diminuiva significativamente da PRE1 e PRE2 a POST ($-7,7\%$ e $-7,6\%$, entrambi $P < 0,001$), rimaneva più bassa a POST24 ($-3,3\%$ sia rispetto a PRE1 che rispetto a PRE2, $P < 0,022$) e ritornava sui livelli basali 48 ore dopo la partita ($P > 0,470$).

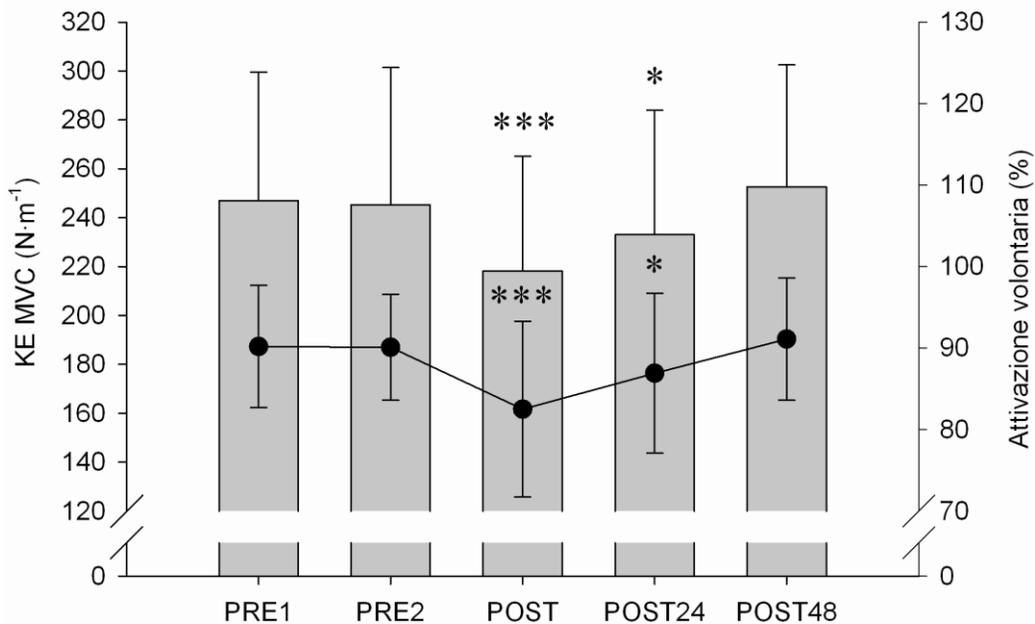


Figura 3. Andamento della MVC (barre grigie) e della massima attivazione volontaria (cerchi e linee) del muscolo quadricipite. PRE1, prima valutazione basale; PRE2, seconda valutazione basale; POST, valutazione 40 minuti dopo la partita; POST24, valutazione 24 ore dopo la partita; POST48, valutazione 48 ore dopo la partita.

Sia il RMS sia il RMS/PPA sono stati influenzati dalla partita ($P < 0,027$, $p\eta^2 = 0,16$ e $P < 0,001$, $p\eta^2 = 0,24$) (figura 4). Subito dopo la partita, il RMS era significativamente inferiore rispetto a PRE1 (-12,1%, $P = 0,003$) e PRE2 (-9,3%, $P = 0,026$). Ventiquattrore dopo la partita, il RMS era ancora più basso rispetto a PRE1 (-8,6%, $P = 0,033$) mentre le differenze non erano significative rispetto a PRE2 (-5,7%, $P = 0,168$). Quarantotto ore dopo la partita, il RMS era simile ai valori PRE1 e PRE2 ($P > 0,340$). Allo stesso modo, il RMS/PPA era diminuito immediatamente dopo l'incontro (vs PRE1 = -12,4%, $P < 0,001$; vs PRE2 = -11,2%, $P = 0,001$) ma non era significativamente diverso rispetto ai valori basali pre-match a POST24 e a POST48 ($P > 0,135$).

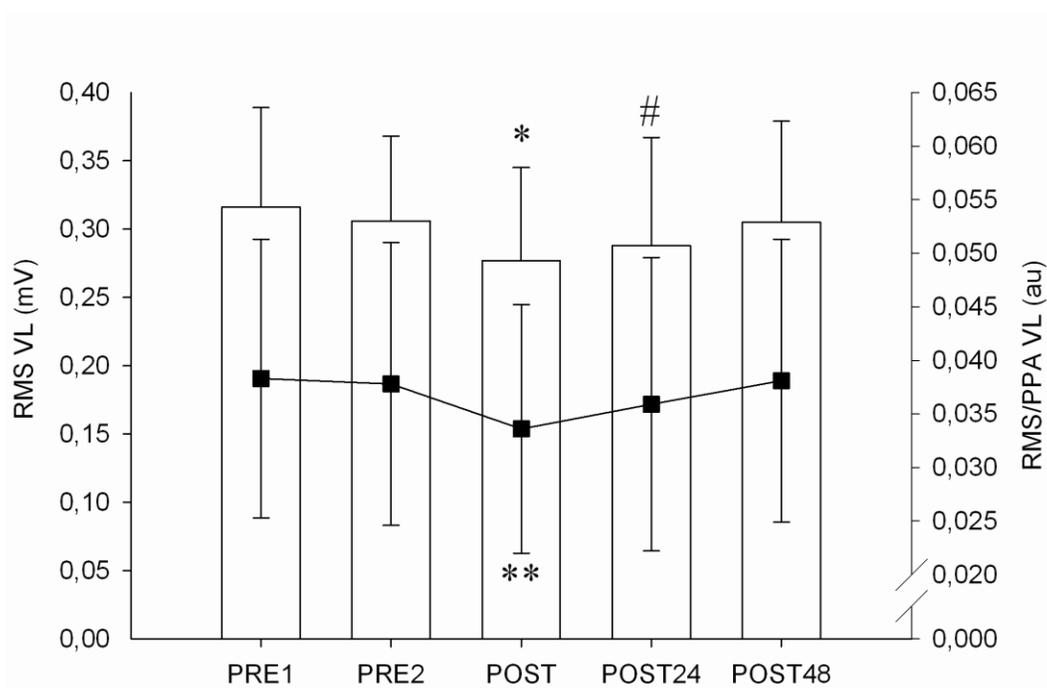


Figura 4. Andamento del segnale elettromiografico (RMS barre bianche, RMS/PPA linee e quadrati) del vasto laterale nel corso del test di MVC. PRE1, prima valutazione basale; PRE2, seconda valutazione basale; POST, valutazione 40 minuti dopo la partita; POST24, valutazione 24 ore dopo la partita; POST48, valutazione 48 ore dopo la partita.

M-wave e funzionalità contrattile del muscolo

Le caratteristiche della M-wave non sono state significativamente influenzate dalla partita. Le differenze non erano significative sia per il PPA ($8,76 \pm 2,40$, $8,64 \pm 2,26$, $8,84 \pm 2,58$, $8,70 \pm 2,69$ e $8,58 \pm 2,48$ mV a PRE1, PRE2, POST, POST24 e POST48; $P = 0,956$, $p\eta^2 = 0,01$) sia per il peak-to-

peak duration ($6,48 \pm 1,14$, $6,54 \pm 1,26$, $6,64 \pm 1,18$, $6,26 \pm 0,80$ e $6,17 \pm 0,75$ mV a PRE1, PRE2, POST, POST24 e POST48; $P = 0,386$, $p\eta^2 = 0,06$).

Le qualità contrattili del quadricipite misurate prima e dopo della partita sono riportate in tabella 1.

Tabella 1. Media \pm SD delle proprietà contrattili del muscolo prima e dopo della partita di calcio determinate utilizzando stimoli elettrici singoli o doppi.

	PRE1	PRE2	POST	POST24	POST48	ANOVA p level	$p\eta^2$
<i>1 Hz</i>							
PT (N·m ⁻¹)	74.1 \pm 15.2	74.1 \pm 14.4	68.3 \pm 16.5 ^a	71.9 \pm 15.7	73.3 \pm 12.6	< 0.001	0.33
CT (ms)	82.9 \pm 16.3	82.7 \pm 16.1	82.1 \pm 18.0	82.7 \pm 13.6	82.5 \pm 13.7	0.991	0.01
MRTD (N·m ⁻¹ ·ms ⁻¹)	1.72 \pm 0.44	1.71 \pm 0.44	1.60 \pm 0.47	1.66 \pm 0.40	1.68 \pm 0.44	0.086	0.12
MRTR (N·m ⁻¹ ·ms ⁻¹)	0.81 \pm 0.16	0.81 \pm 0.18	0.74 \pm 0.19 ^b	0.77 \pm 0.15	0.80 \pm 0.14	0.044	0.14
<i>10 Hz</i>							
PT (N·m ⁻¹)	111.4 \pm 27.6	111.5 \pm 27.5	101.4 \pm 27.0 ^a	107.8 \pm 27.8 ^c	110.5 \pm 25.5	< 0.001	0.53
CT (ms)	172.6 \pm 11.2	172.9 \pm 11.0	174.6 \pm 14.9	171.8 \pm 9.2	172.6 \pm 10.0	0.740	0.03
MRTD (N·m ⁻¹ ·ms ⁻¹)	2.05 \pm 0.55	2.03 \pm 0.57	1.82 \pm 0.58 ^a	1.94 \pm 0.58 ^a	2.04 \pm 0.55	< 0.001	0.46
MRTR (N·m ⁻¹ ·ms ⁻¹)	1.31 \pm 0.34	1.30 \pm 0.34	1.17 \pm 0.36 ^a	1.26 \pm 0.36	1.29 \pm 0.35	< 0.001	0.41
<i>100 Hz</i>							
PT (N·m ⁻¹)	122.9 \pm 20.9	123.4 \pm 21.6	119.2 \pm 24.7	121.9 \pm 20.2	121.8 \pm 20.8	0.272	0.08
CT (ms)	119.5 \pm 13.1	119.8 \pm 13.7	114.0 \pm 20.5	117.1 \pm 12.4	119.0 \pm 10.4	0.324	0.07
MRTD (N·m ⁻¹ ·ms ⁻¹)	3.01 \pm 0.56	3.03 \pm 0.58	2.86 \pm 0.77	3.03 \pm 0.59	3.04 \pm 0.57	0.075	0.12
MRTR (N·m ⁻¹ ·ms ⁻¹)	1.59 \pm 0.38	1.61 \pm 0.39	1.54 \pm 0.41	1.57 \pm 0.39	1.60 \pm 0.38	0.257	0.08

^a, significativamente diverso da tutte le altre condizioni, $p < 0,05$; ^b, significativamente diverso da PRE1, PRE2 and POST48, $p < 0,05$; ^c, significativamente diverso da PRE1, PRE2 and POST, $p < 0,05$.

1 Hz, stimolo singolo; 10 Hz, coppia di stimoli con 100 ms di intervallo; 100 Hz, coppia di stimoli con 10 ms di intervallo; PT, picco del momento di forza; CT, contraction time; MRTD, maximal rate of torque development; MRTR, maximal rate of torque relaxation; PRE1 e PRE2, prima della partita; POST, immediatamente dopo la partita; POST24, 24 ore dopo la partita; POST48, 48 ore dopo la partita.

Sono state individuate differenze significative per il PT a 1 Hz ($P < 0,001$, $p\eta^2 = 0,33$) e per il PT a 10 Hz ($P < 0,001$, $p\eta^2 = 0,53$) mentre le differenze non erano significative per il PT a 100 Hz

($P < 0,272$, $p\eta^2 = 0,08$). Subito dopo la partita, il PT a 1 Hz era significativamente minore rispetto a PRE1 (-7,9%, $P < 0,001$) e PRE2 (-7,9%, $P < 0,001$). Per questo parametro non è stata individuata alcuna altra differenza significativa ($P > 0,073$). Anche il PT a 10 Hz era significativamente diminuito subito dopo la partita rispetto a PRE1 (-9,0%, $P < 0,001$) e PRE2 (-9,1%, $P < 0,001$). Il PT a 10 Hz misurato a POST24 era significativamente maggiore rispetto a POST (+6,3%, $P < 0,001$) ma significativamente minore di PRE1 (-3,2%, $P = 0,013$) e PRE2 (-3,4%, $P = 0,010$). Quarantotto ore dopo il match, il PT a 10 Hz era simile ai valori basali pre-match ($P = 0,446$). Di conseguenza, il rapporto 10/100 Hz è risultato essere significativamente influenzato dalla partita ($P < 0,001$, $p\eta^2 = 0,24$). I rapporti misurati a POST erano significativamente minori rispetto ai rapporti misurati dopo la partita ($0,90 \pm 0,12$, $0,90 \pm 0,11$ e $0,85 \pm 0,11$ per PRE1, PRE2 e POST, tutti i $P < 0,001$). Anche i rapporti a POST24 erano ancora ridotti ($0,87 \pm 0,11$), le differenze con i valori basali non erano significative ($P > 0,073$). I rapporti a POST48 erano simili ai valori basali ($0,90 \pm 0,08$; vs PRE1, $P = 0,995$ e vs PRE2, $P = 0,857$).

Tutti i valori di CT (1, 10 e 100 Hz) erano costanti nel corso dello studio ($P < 0,323$, $p\eta^2 = 0,08$). I cambiamenti di MRTD a 10 Hz erano significativi ($P < 0,001$, $p\eta^2 = 0,41$) mentre non lo erano quelli di MRTD a 1 o 100 Hz ($P < 0,086$, $p\eta^2 = 0,12$ e $P < 0,075$, $p\eta^2 = 0,12$). La MRTD a 10 Hz a POST era significativamente inferiore rispetto a PRE1 (-11,0%, $P < 0,001$) e PRE2 (-10,3%, $P < 0,001$). A POST24, i valori di MRTD erano parzialmente recuperati (vs POST = +6,3%, $P = 0,003$) ma erano ancora inferiori rispetto a PRE1 (-5,4%, $P = 0,005$) e PRE2 (-4,7%, $P = 0,014$). A POST48 i valori di MRTD a 10 Hz erano simili ai valori basali pre-match ($P > 0,768$). Differenze significative sono state individuate per i valori di MRTR a 1 Hz ($P = 0,044$, $p\eta^2 = 0,14$) e a 10 Hz ($P < 0,001$, $p\eta^2 = 0,41$), mentre non sono state individuate differenze significative per MRTR a 100 Hz ($P < 0,257$, $p\eta^2 = 0,08$). I valori di MRTR a 1 Hz e a 10 Hz erano significativamente ridotti a POST rispetto a PRE1 (-7,7%, $P = 0,015$ e -10,3%, $P < 0,001$) e PRE2 (-8,5%, $P = 0,007$ e -9,9%, $P < 0,001$). Sia i valori di MRTR a 1 Hz sia a 10 Hz misurati a POST24 e POST48 non erano significativamente diversi dai valori basali pre-match ($P > 0,069$).

La capacità di sprint

La performance di sprint era significativamente influenzata dalla partita (tabella 2). Infatti i tempi di SPR_{40m} , SPR_{acp} , SPR_{dcp} e SPR_{flp} erano significativamente maggiori dopo la partita (tutti i $P < 0,009$, tutti $p\eta^2 > 0,18$). In particolare, SPR_{40m} a POST era maggiore di PRE1 (+2,6%, $P < 0,001$) e

PRE2 (+2,9%, $P < 0,001$). Inoltre, SPR_{40m} a POST24 era minore di POST (-1,6%, $P = 0,001$) ma ancora maggiore rispetto a PRE1 (+0,9%, $P = 0,049$) e PRE2 (+1,2%, $P = 0,010$). Quarantotto ore dopo la partita i valori di SPR_{40m} erano simili ai valori basali ($P > 0,219$). I tempi di SPR_{acp} e SPR_{dcp} erano significativamente elevati a POST rispetto a PRE1 (+2,3%, $P = 0,003$ e +3,9%, $P < 0,001$) e PRE2 (+2,7%, $P = 0,001$ e +4,4%, $P < 0,001$). Tuttavia, sia i valori di SPR_{acp} sia quelli di SPR_{dcp} a POST24 erano simili ai valori basali ($P > 0,105$). I valori di SPR_{flp} erano maggiori a POST e POST24 (tra +1,1% e +1,6%, $P < 0,038$) ma ritornavano simili ai valori basali a POST48 ($P > 0,580$).

Tabella 2. Capacità di sprint e abilità di passaggio (determinate usando il Loughborough Soccer Passing Test) prima e dopo della partita di calcio.

	PRE1	PRE2	POST	POST24	POST48	P level	$p\eta^2$
<i>Sprint performance</i>							
SPR_{40m} (s)	6.77 ± 0.19	6.75 ± 0.18	6.94 ± 0.26 ^a	6.83 ± 0.20 ^b	6.79 ± 0.14	< 0.001	0.44
SPR_{acp} (s)	2.44 ± 0.08	2.43 ± 0.08	2.49 ± 0.11 ^c	2.46 ± 0.12	2.46 ± 0.07	0.008	0.19
SPR_{dcp} (s)	2.17 ± 0.08	2.16 ± 0.08	2.25 ± 0.11 ^a	2.18 ± 0.05	2.17 ± 0.05	< 0.001	0.29
SPR_{flp} (s)	2.16 ± 0.08	2.16 ± 0.08	2.19 ± 0.09 ^d	2.18 ± 0.06 ^d	2.15 ± 0.06	0.003	0.22
<i>Short-passing ability</i>							
LSPT total (s)	50.9 ± 5.5	50.1 ± 4.4	49.5 ± 4.1	51.6 ± 3.6	51.1 ± 4.5	0.442	0.06
LSPT time (s)	40.8 ± 2.4	40.6 ± 2.5	39.7 ± 2.5	40.5 ± 2.5	40.2 ± 2.4	0.172	0.09
LSPT penalties (s)	10.1 ± 9.5	9.5 ± 4.1	9.8 ± 3.7	11.1 ± 3.4	10.9 ± 3.6	0.389	0.06
LSPT RPE (au)	2.7 ± 0.9	2.5 ± 0.9	4.0 ± 1.2 ^a	2.6 ± 0.9	2.5 ± 0.8	< 0.001	0.51

^a, significativamente diverso da tutti gli altri livelli $p < 0,01$; ^b, significativamente diverso da PRE1, PRE2 e POST, $p < 0,05$;

^c, significativamente diverso da PRE1 e PRE2, $p < 0,005$; ^d, significativamente diverso da PRE1, PRE2 e POST48, $p < 0,01$.

SPR_{40m} , tempo per coprire tutta la distanza; SPR_{acp} , tempo per effettuare la fase di accelerazione 0-15 m; SPR_{dcp} , tempo per effettuare il cambio di direzione 15-25 m; SPR_{flp} , tempo per completare la fase lanciata 25-40 m; LSPT total, performance totale nel Loughborough Soccer Passing Test; LSPT time, tempo per completare il Loughborough Soccer Passing Test; LSPT penalties, penalità accumulate nel Loughborough Soccer Passing Test.

Il test di passaggio (Loughborough Soccer Passing Test)

L'abilità di effettuare passaggi non era significativamente influenzata dalla partita (tabella 2). Infatti le differenze per LSPT total ($P < 0,442$, $p\eta^2 = 0,06$), LSPT time ($P < 0,172$, $p\eta^2 = 0,09$) e LSPT penalties ($P < 0,389$, $p\eta^2 = 0,06$) non erano significative. Solo la RPE ($P < 0,001$, $p\eta^2 = 0,51$) riferita al test LSPT era aumentata a POST rispetto a PRE1 (+49,7%, $P < 0,001$) e PRE2 (+60,7%, $P < 0,001$). Tuttavia, la RPE a POST24 e POST48 era simile ai valori basali ($P > 0,422$).

Percezione di dolore muscolare e parametri biochimici

La percezione di dolore muscolare quantificata tramite l'utilizzo della VAS era significativamente influenzata dall'esercizio ($P < 0,001$, $p\eta^2 = 0,59$). I valori erano significativamente maggiori fino a POST24 ($P < 0,046$) rispetto ai valori basali pre-match. (PRE1 = $1,12 \pm 0,72$ au, PRE2 = $1,09 \pm 1,12$ au, POST = $3,82 \pm 1,65$ au, POST24 = $1,79 \pm 1,32$ au e POST48 = $1,71 \pm 1,08$ au). I valori di CK rimanevano significativamente elevati ($P < 0,001$, $p\eta^2 = 0,62$) fino a 48 ore dopo il match ($P < 0,001$) se comparati con i valori basali (PRE2 = 310 ± 226 U·L⁻¹, POST = 652 ± 319 U·L⁻¹, POST24 = 695 ± 375 U·L⁻¹ e POST48 = 506 ± 258 U·L⁻¹).

Relazioni con la fatica di tipo centrale e con quella di tipo periferico

Le correlazioni tra i cambiamenti degli indicatori di fatica centrale o periferica e le variabili selezionate sono riportate in tabella 3. Tra gli indicatori di performance fisica della partita, solo la TD è risultata essere significativamente correlata ai cambiamenti di %VA ($r = -0,51$, $P < 0,05$). La RPE del match è risultata significativamente correlata al decremento del PT a 10 Hz ($r = -0,50$, $P < 0,05$) e al decremento del PT a 100 Hz ($r = -0,50$, $P < 0,05$). Il decremento del picco di momento di forza durante il test di MVC era significativamente correlato al calo di %VA ($r = 0,86$, $P < 0,001$) e al calo di RMS/PPA ($r = 0,61$, $P < 0,01$), ma no con il calo degli indicatori di fatica periferica ($r < 0,27$, $P < 0,05$). Gli indicatori di fatica centrale erano anche significativamente correlati ai cambiamenti nel test di sprint. Infatti, i cali di %VA erano significativamente correlati ai cambiamenti di SPR_{40m} ($r = -0,63$, $P < 0,05$), SPR_{acp} ($r = -0,55$, $P < 0,05$) e SPR_{dcp} ($r = -0,52$, $P < 0,05$). Inoltre, i cali di RMS/PPA erano significativamente correlati ai cambiamenti di SPR_{40m} ($r = -0,49$, $P < 0,05$) e SPR_{acp} ($r = -0,53$, $P < 0,05$). I cambiamenti dell'indicatore del test di passaggio LSPT total non erano significativamente correlati a nessun indicatore di fatica centrale o periferica. La percezione di dolore muscolare post gara era significativamente correlata ai cali di PT a 1 Hz ($r = -0,77$, $P < 0,001$), PT a 10 Hz ($r = -0,65$, $P < 0,01$) e PT a 100 Hz ($r = -0,57$, $P < 0,05$) ma non lo era con gli indicatori di fatica centrale.

Tabella 3. Coefficienti di correlazione tra i cambiamenti degli indicatori di fatica centrale e periferica e la performance fisica, l'intensità di esercizio nella partita, i cambiamenti della massima attivazione volontaria, la capacità di sprint, la capacità di passaggio e il dolore muscolare (cambiamenti POST vs PRE2).

	Indicatori fatica centrale		Indicatori fatica periferica		
	% VA (differenza)	MVC RMS/PPA (differenza %)	PT 1 Hz (differenza %)	PT 10 Hz (differenza %)	PT 100 Hz (differenza %)
<i>Performance ed intensità della partita</i>					
TD (m)	-0.51 *	-0.25	-0.19	-0.20	-0.17
HIR (m)	-0.36	-0.11	-0.22	-0.24	-0.20
Heart Rate mean (% of max)	-0.18	-0.44	-0.05	-0.05	0.01
RPE (au)	0.25	0.24	-0.29	-0.50 *	-0.50 *
<i>MVC</i>					
PT (% change)	0.86 ***	0.61 **	0.09	0.02	0.26
<i>Performance di Sprint</i>					
SPR _{40m} (% change)	-0.63 **	-0.49 *	0.05	0.09	-0.01
<i>Abilità di passaggio</i>					
LSPT Total (% change)	-0.19	-0.14	-0.13	-0.31	0.03
<i>Percezione del dolore muscolare</i>					
VAS (difference)	0.13	0.14	-0.77 ***	-0.65 **	-0.57 *

%VA, massima attivazione volontaria; , MVC, massima contrazione volontaria; RMS/PPA, root mean square del segnale EMG normalizzato per l'ampiezza della M-wave; PT, picco del momento di forza; 1 Hz, stimolazioni singole; 10 Hz, stimolazioni doppie con 100 ms di intervallo; 100 Hz, stimolazioni doppie con 10 ms di intervallo; TD, distanza totale; HIR, distanza percorsa ad alta intensità; RPE, Rating of Perceived Exertion; SPR_{40m}, tempo necessario per coprire l'intera distanza; LSPT total, performance totale nel Loughborough Soccer Passing Test; VAS, visual analog scale. *, p <0.05; **, p<0.01; ***, p<0.001.

Discussione

I risultati del presente studio hanno dimostrato che una partita disputata da giocatori di alto livello induce una riduzione della MVC e della capacità di sprint. Al contrario, nonostante l'incremento della RPE, l'abilità di effettuare passaggi corti resta stabile. In questa particolare popolazione di atleti, 48 ore di riposo sono un tempo sufficiente al fine di ottenere un completo recupero di tutte le qualità. Inoltre, la fatica indotta da una partita di calcio è determinata da una combinazione di fattori di tipo centrale e periferico. Infatti, sia la %VA sia il RMS/PPA, misurati nel corso del test di MVC, erano ridotti immediatamente dopo la partita così come le proprietà contrattili del muscolo determinate tramite l'utilizzo di stimolazioni elettriche passive (in particolare utilizzando le stimolazioni doppie a 10 Hz). I più alti livelli di fatica centrale sono stati trovati nei giocatori che mostravano anche un elevato decremento di MVC e capacità di sprint, al contrario i giocatori che riportavano il maggior incremento della percezione di dolore muscolare erano quelli con i più marcati livelli di fatica periferica.

La performance fisica nel corso della partita

La performance fisica e l'intensità di esercizio misurati nel presente studio erano simili a quelli precedentemente riportati per i giocatori professionisti di alto livello. La media e il picco di HR (~85% e ~95% della HR massima) erano simili ai valori riportati da altri autori (Ekblom, 1986; Helgerud *et al.*, 2001; Ascensao *et al.*, 2008; Ispirlidis *et al.*, 2008). I valori di TD e di HIR erano paragonabili alle distanze coperte dai giocatori professionisti nel corso delle partite ufficiali (Mohr *et al.*, 2003; Rampinini *et al.*, 2007b). La riduzione significativa della performance fisica (sia TD sia HIR) tra il primo ed il secondo tempo e l'alto valore di RPE a fine partita, suggeriscono che i giocatori sono andati incontro a livelli di affaticamento simili a quelli che si verificano nel corso di incontri ufficiali (Mohr *et al.*, 2003; Rampinini *et al.*, 2007b).

La fatica dopo la partita

Il picco del momento di forza nel corso del test di MVC e la capacità di sprintare erano significativamente ridotte a seguito della partita (~11% e ~3% rispettivamente), al contrario l'abilità di effettuare passaggi rimaneva stabile. Il calo di forza del 9-10% è simile a quanto riportato da altri ricercatori che hanno investigato la fatica in calciatori maschi (Ascensao *et al.*, 2008; Ispirlidis *et al.*, 2008; Thorlund *et al.*, 2009) e può essere classificato come moderato se confrontato con quanto succede a seguito di esercizi di corsa, pedalata o sciata prolungata (20-35%) (Millet and Lepers, 2004).

Le differenze nel calo di forza possono essere giustificate dalle differenze nella durata e nell'intensità dell'esercizio, nella tipologia di contrazione muscolare e nella natura dell'esercizio (continuo vs intermittente). Il calo di performance di sprint è simile a quello riportato da Ispirlidis *et al.* (2008) (20 m sprint, ~2%) o da Krstrup *et al.* (2006b) (30 m sprint, ~3%) ma inferiore a quanto riportato da Ascensao *et al.* (2008) (30 m sprint, ~7%). Dato che l'intensità della partita era molto simile tra i diversi studi, le differenze nei risultati vanno probabilmente attribuite alle diverse caratteristiche individuali dei calciatori coinvolti negli studi. Inoltre, è interessante sottolineare il fatto che tutte e tre le fasi (accelerazione, cambio di direzione e fase lanciata) dello sprint erano negativamente influenzate dallo svolgimento della partita. Al contrario di quanto riportato in un precedente studio (Rampinini *et al.*, 2008), l'abilità di effettuare passaggi corti valutata tramite l'utilizzo del LSPT non significativamente ridotta e solo la RPE relativa era aumentata. A tale proposito, si potrebbe speculare che, nel precedente studio, i giovani calciatori coinvolti potrebbero aver raggiunto dei livelli di fatica post-match significativamente maggiori rispetto a quelli raggiunti dai professionisti coinvolti nella presente ricerca. Conseguentemente, i maggiori livelli di affaticamento potrebbero aver negativamente influenzato anche l'abilità di passaggio diversamente da quanto avvenuto nel presente studio. Tuttavia, questa speculazione andrebbe confermata con studi futuri che prevedano la quantificazione dell'affaticamento neuromuscolare in giocatori di diverso livello competitivo. Inoltre, occorre considerare che la tempistica con cui sono state fatte le valutazioni nei due studi sono leggermente diverse (nel corso della partita nello studio precedente vs 40 minuti dopo la fine della partita nella presente ricerca). Questo potrebbe essere un altro elemento che, almeno in parte, può spiegare le differenze nei risultati dei due studi.

Nel corso della valutazione dalla MVC sono state effettuate delle misure aggiuntive per determinare la presenza di fatica centrale. Il valore RMS del segnale EMG del VL era significativamente diminuito nella sessione POST. Tuttavia, la riduzione del RMS non è necessariamente rappresentativa della riduzione del comando motorio a livello centrale (Millet and Lepers, 2004). Infatti è stata suggerita la normalizzazione del segnale EMG utilizzando il valore di ampiezza della M-wave, al fine di tenere in considerazione i cambiamenti di eccitabilità da parte del muscolo a livello periferico. I valori della M-wave (ampiezza e durata) erano stabili nel corso dello studio. Di conseguenza il rapporto RMS/PPA era significativamente ridotto immediatamente dopo la partita suggerendo che, almeno in parte, la capacità di produrre la forza massima era da attribuire ad

una fatica di tipo centrale. Per confermare questi risultati, è stata anche misurata la %VA tramite la tecnica della interpolated-twitch. La riduzione di ~8% della %VA suggerisce che il comando motorio centrale non era ottimale nella sessione POST e questo aspetto potrebbe aver influenzato non solo il test di MVC ma anche la capacità di sprint. Come riportato da Gandevia (2001), la fatica di tipo centrale può avere origine a livello spinale o sovra spinale. Sfortunatamente, nel presente studio non è stato possibile determinare con precisione l'esatta origine ma è stato possibile solo determinare genericamente la presenza di fatica di tipo centrale. Tuttavia, nel corso di una partita si verificano numerose alterazioni a livello biochimico (aumento dei livelli circolanti di grassi liberi, aumento dei livelli di ammoniaca circolante, interleuchina-1 e interleuchina-6) (Krustrup *et al.*, 2006b; Ispirlidis *et al.*, 2008); queste alterazioni possono essere interpretate come un'evidenza indiretta dell'inibizione del comando motorio centrale a livello sovra spinale (Meeusen *et al.*, 2006). Inoltre, l'alterazione dei livelli di pH e di K⁺ a livello muscolare nel corso della partita, potrebbero stimolare le terminazioni afferenti muscolare dei gruppi III e IV, le quali potrebbero inibire i motoneuroni a livello spinale (Gandevia, 2001). Infine, il sistema dei fusi neuromuscolari potrebbero essere coinvolti nella riduzione della %VA dato che è stato dimostrato che addirittura lo stiramento passivo dei muscoli riduce i riflessi da stiramento (Avela *et al.*, 1999).

Usando le stimolazioni elettriche passive, è stato possibile determinare la funzionalità neuromuscolare del quadricipite prima e dopo della partita. Il fatto che la M-wave è risultata stabile nel corso dello studio suggerisce che la trasmissione del potenziale d'azione sul sarcolemma è probabilmente conservata (Fitts, 1994). I risultati del presente studio sono simili a quanto riportato per altri sport intermittenti come tennis e squash (Girard and Millet, 2009). Dato che la M-wave relativa ai flessori plantari non è stata determinata nel presente studio, la stessa potrebbe essere oggetto di ricerche future visto che potrebbe mostrare una maggiore sensibilità alla fatica rispetto alla M-wave del muscolo quadricipite (Behm and St-Pierre, 1997). Infatti, è stato dimostrato che la M-wave dei flessori plantari è significativamente influenzata da una partita di tennis (Girard and Millet, 2009). La risposta meccanica del quadricipite utilizzando stimoli elettrici singoli o doppi a 10 Hz (bassa frequenza) era negativamente influenzata dalla partita. Il PT era ridotto del 8-9% mentre il MRTD e il MRTR erano ridotti del 9-10%. Al contrario, non è stata individuata alcuna alterazione significativa della risposta meccanica utilizzando coppie di stimoli ad alta frequenza (100 Hz). Di conseguenza, il rapporto 10/100 Hz era significativamente ridotto confermando la presenza di low-frequency fatigue (o fatica di lunga

durata). Queste alterazioni suggeriscono che, in aggiunta agli aspetti centrali, una partita di calcio induce anche una fatica di tipo periferico. La presenza di low-frequency fatigue in aggiunta all'incremento della percezione del dolore muscolare, agli aumentati livelli di CK in circolo e alla riduzione della MVC suggeriscono la presenza di danno muscolare indotto dall'esercizio svolto nel corso del match (Warren *et al.*, 1999). Infatti, la low-frequency fatigue potrebbe essere determinata sia una ridotta efficienza del meccanismo di eccitazione-contrazione accoppiamento sia da un danno alle strutture muscolari (Allen, 2001). E' ben noto che la low-frequency fatigue è causata da una riduzione del rilascio e/o riassorbimento del Ca^{2+} e/o da un danno o una redistribuzione delle strutture muscolari (Jones, 1996).

Influenza dei fattori di tipo centrale e di quelli di tipo periferici sulla fatica determinata dalla partita

Le analisi di correlazione sono state effettuate per verificare la possibile influenza della fatica centrale e di quella periferica sulla performance e intensità della partita, sulla MVC, sulla capacità di sprint, sul LSPT e sulla percezione di dolore muscolare. L'unica correlazione significativa moderata individuata con gli indicatori di performance fisica nel corso della partita è stata quella tra %VA e TD. Questo suggerisce che, il lavoro totale svolto o quello fatto con una velocità di corsa elevata *per se* hanno un effetto limitato sull'insorgenza della fatica. Tuttavia, nel presente studio, la performance fisica è stata quantificata utilizzando delle soglie di velocità assolute. Potrebbe essere interessante normalizzare il lavoro svolto dai giocatori basandosi su dei livelli individuali che tengano in considerazione i livelli di fitness degli atleti. Infatti, è stato dimostrato che la condizione atletica dei giocatori influenza la performance fisica degli stessi nel corso delle partite (Krustrup *et al.*, 2003; Krustrup *et al.*, 2006a; Rampinini *et al.*, 2007a). Correlazioni significative ma moderate sono state individuate tra i valori di RPE della partita e gli indicatori di fatica periferica confermando il possibile legame tra l'aumentata percezione dello sforzo e la ridotta efficienza del muscolo quadricipite. Infatti, la riduzione di efficienza a livello periferico potrebbe indurre gli atleti ad aumentare l'entità del comando motorio a livello centrale al fine di mantenere la performance nel tempo. L'aumentato comando motorio a livello centrale potrebbe conseguentemente influenzare l'aumento della percezione dello sforzo nel corso dell'esercizio (Taylor and Gandevia, 2008).

Le correlazioni significative (da moderate ad elevate) individuate tra riduzione di MVC o capacità di sprint e fatica di tipo centrale suggeriscono che questo aspetto sembra essere predominante così come avviene per altri sport di endurance (Millet *et al.*, 2003). I risultati di questo studio

supportano ulteriormente il concetto secondo cui, in queste tipologie di esercizio, la riduzione di espressione della massima forza è maggiormente influenzata da fattori di tipo centrale rispetto a quelli di tipo periferico.

Non è stata individuata alcuna correlazione significativa tra i cambiamenti di abilità di passaggio e gli indicatori di fatica centrale o periferica. Tuttavia, come anche suggerito precedentemente, è possibile che il livello di affaticamento raggiunto dagli atleti nel corso della presente ricerca non sia stato sufficientemente alto. Studi futuri saranno necessari per verificare ulteriormente questo aspetto.

Infine, la riduzione di efficienza a livello periferico è stata associata ad un incremento della percezione di dolore muscolare (correlazioni da moderate ad elevate). Il danno muscolare e/o lo stato di infiammazione generato dall'esercizio sono i maggiori candidati che possono spiegare le correlazioni individuate (Cheung *et al.*, 2003).

Il recupero dopo la partita

Nel presente studio, la MVC, la capacità di sprint e il dolore muscolare ritornavano a livelli simili a quelli basali 48 ore dopo la partita. L'andamento degli indicatori di fatica centrale e di fatica periferica era simile. Infatti, 24 ore dopo la partita, la %VA, il RMS del segnale EMG del VL e le proprietà contrattili del muscolo a livello periferico erano significativamente ridotte ma si normalizzavano due giorni dopo la partita. Altri studi hanno suggerito che la riduzione prestativa degli atleti persiste per diverse ore dopo il match (Ascensao *et al.*, 2008; Ispirlidis *et al.*, 2008). Tuttavia, per la prima volta è stato determinato che il calo prestativo è determinato da una combinazione di fattori di tipo centrale e periferico sia immediatamente che 48 ore dopo una partita. E' molto probabile che il danno muscolare da esercizio, la deplezione di glicogeno muscolare, la risposta infiammatoria dell'organismo e la percezione del dolore muscolare *per se* siano i maggiori meccanismi fisiologici responsabili della fatica centrale e periferica.

I calciatori professionisti partecipanti allo studio, hanno mostrato un tempo di recupero post-match inferiore rispetto a quanto precedentemente riportato da altri autori (48 vs 72 ore) (Ascensao *et al.*, 2008; Ispirlidis *et al.*, 2008). Dato che l'intensità di esercizio delle partite era molto simile tra i diversi studi sembra che il livello di fitness degli atleti partecipanti alle diverse ricerche possa essere l'elemento chiave che può spiegare l'accelerato o ritardato recupero. Basandosi sui risultati di questo studio, sembra che i calciatori professionisti di alto livello sono in grado di sostenere due partite

consecutive nel corso di 3 giorni. Questo aspetto risulta particolarmente rilevante per le squadre che devono partecipare a competizioni nazionali e coppe europee che costringono gli atleti a giocare spesso ogni 3-4 giorni. Tuttavia, al momento non è possibile escludere il fatto che si possa verificare un effetto cumulativo dei livelli di fatica quando numerosi match sono disputati con pochi giorni di recupero tra uno e l'altro. Studi futuri dovranno essere condotti per verificare l'insorgenza della fatica centrale e di quella periferica a seguito di una serie di partite giocate con tempi di recupero relativamente brevi.

In conclusione, una partita giocata da calciatori professionisti di alto livello induce una riduzione della MVC e della capacità di sprint mentre l'abilità di passaggio sembra essere stabile. Le variabili negativamente influenzate dalla partita ritornano a livelli basali 48 ore dopo la stessa. La fatica causata da una partita di calcio è determinata da una combinazione di fattori di tipo centrale e periferico sia immediatamente dopo sia nel periodo di recupero che segue il match. La fatica di tipo centrale sembra essere la causa principale della riduzione di MVC e capacità di sprint, mentre quella di tipo periferico sembra essere maggiormente collegata alla percezione di dolore e quindi al danno e all'infiammazione che si viene a creare nel muscolo.

Capitolo 3

DISTRIBUZIONE DEI GOL REALIZZATI NEL CORSO DELLE PARTITE

Introduzione

Il calcio è uno sport di squadra che richiede ai giocatori di sostenere uno sforzo intermittente ad alta intensità. E' noto che la distanza totale e la distanza corsa ad alta intensità è significativamente ridotta nel secondo rispetto al primo tempo (Mohr *et al.*, 2003). Inoltre, la distanza percorsa ad alta intensità negli ultimi 15 minuti di gioco è significativamente inferiore (20-40%) rispetto a quella percorsa alla stessa intensità negli ultimi 15 minuti di gioco (Mohr *et al.*, 2003; Bradley *et al.*, 2009). E' anche noto che, utilizzando un protocollo di valutazione standardizzato, la capacità di effettuare sprint singoli o ripetuti è significativamente diminuita alla fine di un incontro di calcio (Krustrup *et al.*, 2006b; Rampinini *et al.*, 2011). Tutte queste evidenze suggeriscono che i calciatori incorrono in situazioni di fatica nel corso della partita e in particolare nella fase finale della stessa (Mohr *et al.*, 2005). Inoltre, è stato riportato che la fatica generata dalla partita può avere un effetto negativo non solo sulla capacità di sprint o sulla performance di sostenere lavoro ad alta intensità ma anche sulla capacità di effettuare passaggi con precisione (Rampinini *et al.*, 2008).

Alcune osservazioni preliminari hanno suggerito che la frequenza dei gol realizzati nel corso del match aumenta con il passare del tempo (Abt *et al.*, 2002; Armatas *et al.*, 2009). Questo specifico pattern potrebbe suggerire l'esistenza di un legame tra l'incremento dei livelli di fatica dei giocatori e la frequenza di gol realizzati. Tuttavia, le osservazioni preliminari sono basate sull'analisi di campionati minori o su un numero di partite abbastanza limitato.

Di conseguenza, lo scopo di questo studio è stato quello di esaminare la frequenza dei gol realizzati nel corso dei diversi momenti della partita nei quattro maggiori campionati nazionali europei in tre stagioni consecutive. E' stato ipotizzato che la frequenza dei gol realizzati è maggiore nel secondo rispetto al primo tempo e, dividendo la partita in quarti di gioco, la frequenza dei gol realizzati è maggiore nei 15 minuti finali del match.

Materiali e Metodi

Procedure

Lo studio è stato approvato dall'Institutional Review Board di Mapei Sport in linea con la dichiarazione di Helsinki. L'analisi della frequenza dei gol realizzati è stata effettuata considerando le partite ufficiali di quattro maggiori campionati nazionali europei (Premier League inglese, ING; Ligue 1 francese, FRA, Serie A italiana, ITA; Liga spagnola, SPA) nel corso di tre stagioni agonistiche

consecutive (2008-09, 2009-10 e 2010-11). Tutti i dati sono stati raccolti dai siti web ufficiali dei singoli campionati (<http://www.premierleague.com>, <http://www.ligue1.com>, <http://www.legaseriea.it>, <http://www.lfp.es>).

Analisi Statistica

Il test non parametrico Chi Square (χ^2) è stato utilizzato per verificare le differenze nella frequenza dei gol realizzati tra primo e secondo tempo e tra i sei quarti di gioco della partita (0-15, 15-30, 30-45, 45-60, 60-75 e 75-90). Queste differenze sono state verificate in quattro diversi campionati nazionali europei nel corso di tre stagioni agonistiche consecutive. I gol realizzati nel corso del tempo di recupero del primo e del secondo tempo sono stati esclusi dall'analisi. Il livello di significatività è stato fissato a $P < 0,05$.

Risultati

Sono stati analizzati 10885 gol realizzati nel corso di 4560 partite. L'analisi con χ^2 ha rivelato una frequenza dei gol realizzati maggiore ($P < 0,001$) nel secondo (55,1%) rispetto al primo tempo (44,9%) indipendentemente dal campionato analizzato o dalla stagione agonistica considerata ($P > 0,60$). La frequenza dei gol realizzati nel corso del primo e del secondo tempo è riportata nella figura 5.

Allo stesso modo, dividendo la partita in quarti di gioco, è stato individuato un trend crescente ($P < 0,001$) nel numero dei gol realizzati nel corso della partita (0-15 = 13,7%, 15-30 = 15,1%, 30-45 = 16,2%, 45-60 = 17,7%, 60-75 = 17,2% e 75-90 = 20,2%) indipendentemente dal campionato analizzato o dalla stagione agonistica considerata ($P > 0,10$). La frequenza dei gol realizzati nel corso dei diversi quarti di gioco in ognuno dei campionati considerati è riportata nella figura 6.

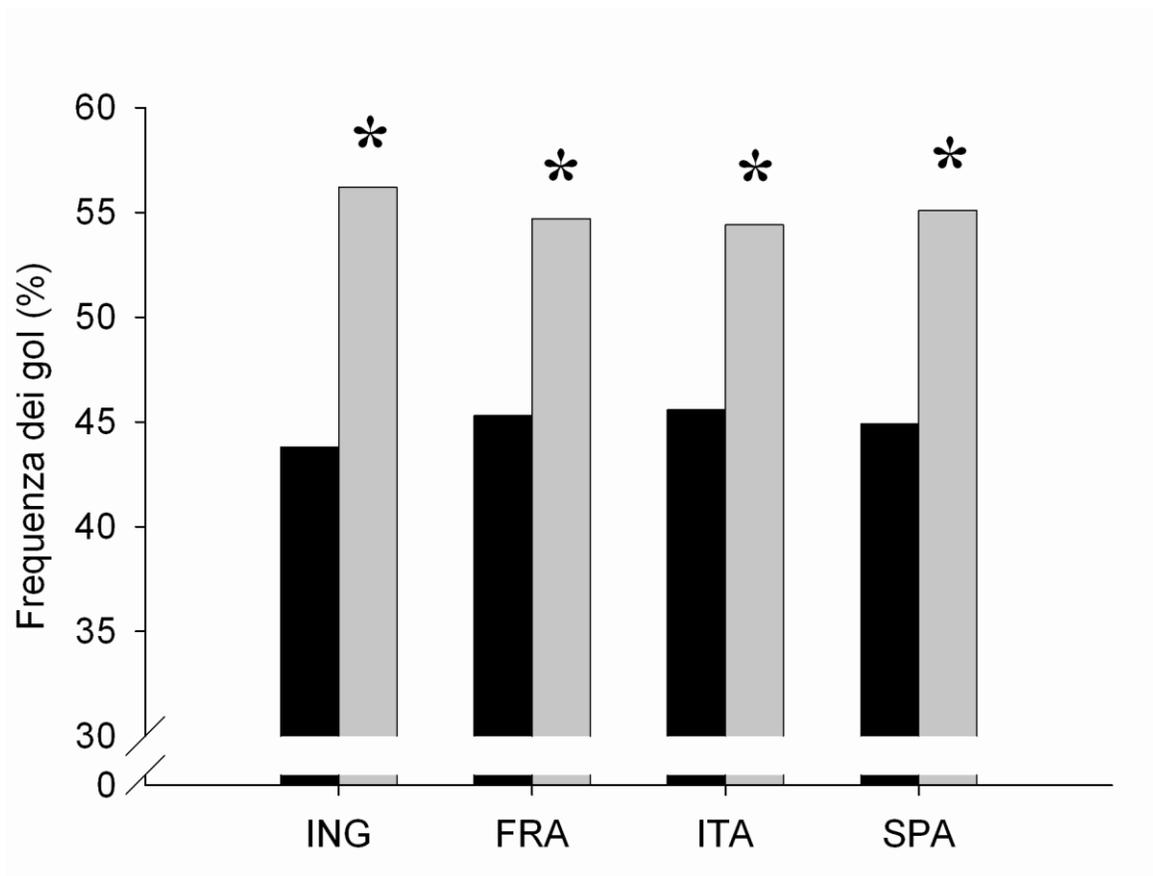


Figura 5. Frequenza dei gol realizzati nel primo (colonne nere) e nel secondo tempo (colonne grigie) in ogni campionato nazionale dal 2008-09 al 2010-11. (ING, Premier League inglese; FRA, Ligue 1 francese; ITA, Serie A italiana; SPA, Liga spagnola). *, $P < 0,001$, significativamente diverso dal primo tempo.

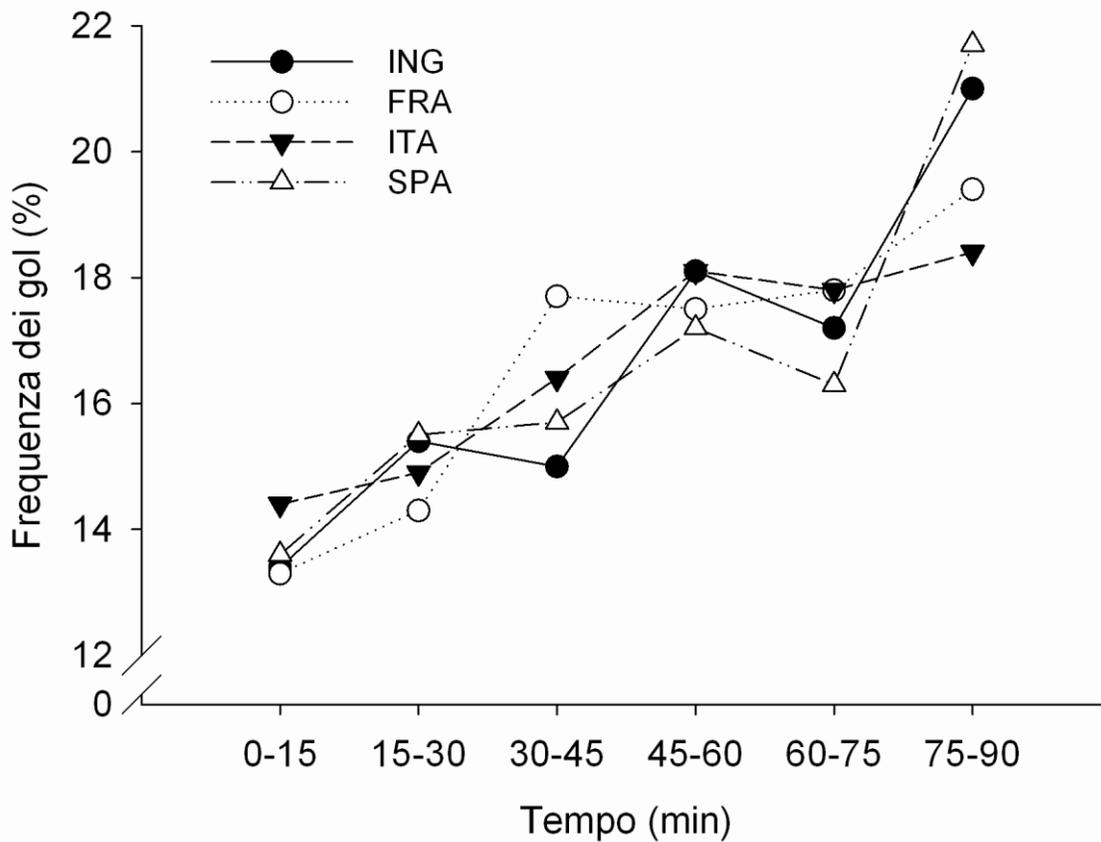


Figura 6. Frequenza dei gol realizzati in ognuno dei quarti di gioco della partita, in ognuno dei campionati nazionali europei, dal 2008-09 al 2010-11. (ING, cerchi neri, Premier League inglese; FRA, cerchi bianchi, Ligue 1 francese; ITA, triangoli neri, Serie A italiana; SPA, triangoli bianchi, Liga spagnola).

Discussione

I risultati di questo studio hanno dimostrato che l'incidenza dei gol realizzati, nel corso delle partite ufficiali dei quattro maggiori campionati nazionali europei, è maggiore nel secondo rispetto al primo tempo. Inoltre, dividendo la partita in quarti di gioco, la frequenza dei gol realizzati è maggiore negli ultimi quindici minuti di gioco.

Sono stati analizzati circa 11000 gol realizzati e non è stata individuata alcuna differenza significativa tra i quattro campionati o le tre stagioni agonistiche considerate. Questi risultati suggeriscono che la distribuzione dei gol realizzati non è dipendente dal campionato considerato o dalla stagione analizzata. È stato riportato che i giocatori incorrono in stati di fatica nel corso e alla fine delle partite (Mohr *et al.*, 2005). Infatti, è stato riportato che la fatica limita la capacità di sprint (Krustrup *et al.*, 2006b) e la capacità di effettuare lavoro ad alta intensità da parte dei calciatori (Mohr *et al.*, 2003; Rampinini *et al.*, 2007b). Inoltre, la fatica può avere un effetto negativo anche sulle abilità tecniche degli atleti (Rampinini *et al.*, 2008; Rostgaard *et al.*, 2008). Questa riduzione della capacità prestativa potrebbe avere un effetto negativo anche sull'efficacia con cui i giocatori marcano gli avversari concedendo maggiori opportunità di realizzazione nel corso del gioco. Tuttavia, nel presente studio, non sono state raccolte informazioni relative alla capacità atletica dei giocatori nel corso delle partite. Conseguentemente, studi futuri dovranno verificare l'ipotesi dell'esistenza di un legame diretto tra evolversi dei livelli di fatica e realizzazione dei gol.

Infatti, la maggior frequenza dei gol realizzati nelle fasi finali delle partite potrebbe anche essere legata al fatto che, con il passare del tempo, le chance di realizzazione semplicemente diminuiscono. Di conseguenza, le squadre che sono in svantaggio tendono ad incrementare i tentativi di realizzazione dei gol dato che la fine del match si avvicina. Anche per questo motivo, sembra che la frequenza dei gol realizzati non possa essere esclusivamente legata ad un singolo fattore ma che sia il risultato dell'interazione di diversi aspetti della prestazione.

In conclusione, nei maggiori campionati nazionali europei la frequenza dei gol realizzati aumenta con il passare del tempo ed è maggiore negli ultimi 15 minuti di gioco. Il pattern della frequenza dei gol realizzati non sembra essere specifico per ogni particolare campionato o stagione agonistica e quindi non sembra essere legato allo stile di gioco di una nazione. L'ipotizzato legame tra l'evolversi dei livelli di fatica dei giocatori e la frequenza dei gol realizzati dovrà essere ulteriormente confermato in studi futuri in cui vengano raccolte informazioni relative ad entrambi questi aspetti.

Capitolo 4

LA FATICA PERIFERICA INDOTTA DA UN ESERCIZIO DI SPRINT RIPETUTI: PEDALARE vs CORRERE

Introduzione

La Repetead-Sprint Ability (RSA) viene definita come l'abilità di ripetere diversi sprint massimali con un tempo di recupero breve e viene considerata una componente fondamentale per la performance fisica dei giocatori praticanti molti sport di squadra quali ad esempio il calcio (Bishop *et al.*, 2011; Girard *et al.*, 2011). Alcuni studi hanno investigato le determinanti fisiologiche e i meccanismi della fatica relativi a questa particolare forma di esercizio (Bishop, 2012). In letteratura, la fatica può essere definita come “un'acuta riduzione prestativa che comprende sia un aumento della percezione dello sforzo necessaria per sviluppare una determinata forza o potenza sia eventualmente l'incapacità di produrre la massima forza o potenza” (Gandevia, 2001). La comprensione dei meccanismi della fatica che si sviluppano nel corso delle prove di RSA può essere utile per attuare delle strategie efficaci nel ritardare l'insorgenza della fatica e quindi può essere utile per il miglioramento della prestazione (Girard *et al.*, 2011).

La fatica indotta da un esercizio di RSA è causata da una combinazione di fattori centrali e periferici (Bishop, 2012). Tuttavia, numerosi studi hanno suggerito che il calo di potenza che si verifica durante le prove di sprint intermittenti non è primariamente causata da un'inibizione a livello centrale ma molto più probabilmente da fattori di tipo periferico (Mendez-Villaneuva *et al.*, 2007; Racinais *et al.*, 2007; Mendez-Villanueva *et al.*, 2008b; Billaut and Bishop, 2012; Bishop, 2012; Girard *et al.*, 2013). La fatica periferica può essere classificata come high-frequency o low-frequency ed entrambe queste due tipologie sembrano essere presenti nella fatica periferica dei flessori plantari (PF) a seguito di una prova di RSA effettuata di corsa (Perrey *et al.*, 2010). Tuttavia, esistono molti fattori (e.g. composizione delle fibre muscolari o tecnica di corsa) che possono influenzare la risposta muscolare e quindi la tipologia di fatica di un particolare gruppo muscolare (Martin *et al.*, 2010). Al momento però nessuno studio ha investigato la fatica periferica indotta da RSA in più di un gruppo muscolare (e.g. PF ed estensori del ginocchio, KE).

La low-frequency fatigue sembra essere prevalente a seguito di esercizi caratterizzati da contrazioni eccentriche (Martin *et al.*, 2005; Girard *et al.*, 2008) o esercizi effettuati ad alta intensità che prevedono il ciclo stiramento-accorciamento (Martin *et al.*, 2005; Girard *et al.*, 2008). Queste evidenze suggeriscono che l'esercizio di RSA effettuato correndo dovrebbe causare un maggior affaticamento di tipo low-frequency rispetto ad un esercizio di RSA svolto pedalando. Tuttavia, la performance nel corso di prove di RSA cycling cala maggiormente rispetto a quanto succede nel corso

di prove di RSA running (Fitzsimons *et al.*, 1993; Bundle and Weyand, 2012) suggerendo un maggior livello di fatica periferica nelle prove di RSA cycling. Ad oggi però, nessuno studio ha comparato direttamente la fatica periferica indotta da protocolli di RSA cycling rispetto a RSA running. Inoltre, in letteratura vengono utilizzati molti rapporti diversi di low- vs high-frequency (singola vs twitch doppia, 10/100 Hz, 20/100 Hz, 20/80 Hz e 20/50 Hz) per la quantificazione della fatica di tipo low-frequency indotta da un particolare esercizio (Jones *et al.*, 1989; Girard *et al.*, 2008; Verges *et al.*, 2009; Iguchi and Shields, 2010; Perrey *et al.*, 2010). Al momento però non esiste alcuna indicazione relativa a quale sia l'indicatore migliore per la quantificazione della low-frequency fatigue.

Lo scopo di questo studio è stato quello di confrontare la fatica periferica in due gruppi muscolari (KE e PF) indotta da due esercizi di RSA caratterizzati dagli stessi tempi di lavoro e recupero ma da una diversa tipologia di esercizio: pedalare (cycling) vs correre (running). Si è ipotizzato la presenza di un maggior affaticamento di tipo high-frequency a seguito del test di RSA cycling e un maggior affaticamento di tipo low-frequency a seguito del test di RSA running.

Materiali e Metodi

Al fine di identificare le differenze nella fatica periferica dei KE e PF indotta da due test di RSA, è stato utilizzato un design crossover randomizzato e controbalanciato. I soggetti sono stati sottoposti ad una sessione preliminare per la familiarizzazione alle procedure e per la determinazione del massimo consumo di ossigeno ($VO_2\max$) al cicloergometro. Nelle due sessioni di test successive separate da 72 ore, sono state determinate le proprietà contrattili dei muscoli KE e PF prima e dopo l'esecuzione di un test di RSA effettuato pedalando o correndo.

Soggetti

Dieci soggetti maschi moderatamente attivi (età: 26 ± 5 anni, altezza 175 ± 5 cm, peso 71 ± 12 kg) sono stati coinvolti nello studio. Prima di iniziare lo studio i soggetti hanno firmato il consenso informato di partecipazione e la ricerca è stata approvata dall'Institutional Review Board di Mapei Sport.

Valutazioni neuromuscolari

Le valutazioni neuromuscolari sono state effettuate in condizioni isometriche misurando i KE della gamba sinistra e i PF della gamba destra. I soggetti erano seduti su una leg extension con la gamba e la coscia sinistra fissate a 90° (dove 0° è l'articolazione del ginocchio completamente distesa).

Inoltre, la caviglia destra era fissata su un dinamometro a pedale (Captels, Saint Mathieu de Trevies, Francia) con un angolo di 90°. Sono state utilizzate anche delle cinture di Velcro per limitare i movimenti del tallone. Una cintura di velcro era anche posizionata intorno al bacino e ai soggetti veniva richiesto di impugnare la seduta durante le contrazioni. La risposta meccanica era registrata tramite l'utilizzo di due celle di carico collegate ad un sistema di acquisizione di dati (BIOPAC MP100, BIOPAC Systems Inc, Santa Barbara, CA) con una frequenza di campionamento di 500 Hz.

Le contrazioni muscolare erano indotte tramite l'utilizzo di stimolazioni elettriche del nervo femorale e del nervo tibiale posteriore. Degli elettrodi (Compex, Ecublens, Svizzera) erano posizionati nel triangolo femorale, sulla fossa poplitea, sulla linea del gluteo e sulla patella. La posizione degli elettrodi era marcata sulla pelle dallo stesso operatore al fine di poter ottenere lo stesso riposizionamento. L'intensità della stimolazione elettrica veniva definita utilizzando uno stimolatore a corrente costante (Digitimer DS7AH, Hertfordshire, UK, massimo voltaggio 400 V) aumentando progressivamente l'intensità di 10 mA finchè veniva raggiunto un plateau nel momento di forza rispettivamente per i muscoli KE e PF. Questa intensità veniva ulteriormente aumentata del 20%. La risposta meccanica dei muscoli KE e PF veniva determinata tramite l'utilizzo di 10 stimolazioni elettriche ognuna separata da 3 secondi. Le dieci stimolazioni comprendevano: 2 stimoli singoli (1 Hz) e due coppie di stimoli inviate a 10 Hz, 20 Hz, 50 Hz e 100 Hz. Gli stimoli venivano prodotti utilizzando un impulso ad onda quadra (200 μ s). Per ogni tipologia di stimolazione venivano calcolati i seguenti parametri: picco del momento di forza (PT), Maximal Rate of Torque Development (MRTD), valore più elevato della derivata prima del segnale di momento di forza espresso, Maximal Rate of Torque Relaxation (MRTR), valore più basso della derivata prima del segnale di momento di forza espresso, Contraction Time (CT), tempo tra l'origine del segnale meccanico, Half-Relaxation Time (HRT), tempo necessario per ottenere un dimezzamento del valore di PT. Come indicatori di low-frequency fatigue venivano calcolati anche i rapporti dei PT a 1/50 Hz, 1/100 Hz, 10/50 Hz, 10/100 Hz, 20/50 Hz e 20/100 Hz.

I test di sprint ripetuti

Dopo un riscaldamento standardizzato, il test di RSA cycling veniva effettuato in laboratorio su un cicloergometro (Monark, modello 894E. Varberg, Svezia), mentre il test di RSA running veniva effettuato su una pista di atletica di 60 m e la velocità di corsa veniva quantificata tramite l'utilizzo di un sistema radar (Stalker ATS system, Radar Sales, Minneapolis, MN). I test di RSA prevedevano

cinque sprint massimali di 6 secondi con 30 secondi di recupero tra gli stessi. Nei test di RSA venivano calcolati i seguenti indici: il miglior sprint (media di velocità o potenza dei 6 secondi di sprint) RSA_{best} , la media di velocità o potenza dei 5 sprint (RSA_{mean}), e il valore percentuale di decremento (RSA_{dec}).

Risposte fisiologiche e percezione dello sforzo

Prima (Pre) e dopo (Post) i test di RSA, venivano raccolti 100 μ L di sangue capillare per l'analisi della concentrazione di idrogenioni (H^+) e bicarbonati (HCO_3^-) tramite un emogas analizzatore (GEM Premier 3000, Instrumentation Laboratory, Milano, Italia). Un campione di sangue capillare (5 μ L) veniva anche raccolto per determinare della concentrazione di lattato (La^-) tramite specifico analizzatore (LactatePro, Arkray, Kyoto, Giappone). Dopo i test di RSA, veniva anche raccolta la percezione dello sforzo generale (RPE overall), la percezione dello sforzo legata alla respirazione (RPE chest) e la percezione dello sforzo muscolare localizzata (RPE leg) utilizzando la scala di Borg CR10. Durante le prove veniva registrata anche la frequenza cardiaca (HR) tramite specifici strumenti (Polar Vantage NV, Kempele, Finlandia).

Analisi statistica

I valori sono presentati come media \pm SD. E' stata utilizzata una serie di ANOVA a due vie per misure ripetute al fine di determinare le differenze tra le due condizioni. Come post-hoc è stato utilizzato il test Tukey's HSD. Come misura di effect size è stato calcolato l'eta squared parziale (${}_p\eta^2$) e i valori di 0,01, 0,06 e sopra 0,15 sono stati considerati come small, medium e large (Cohen, 1988). L'effect size (d) è stato anche calcolato secondo la formula: (media 2 – media 1) / SD dei dati pooled. L'interpretazione dei valori di d è stata effettuata utilizzando la scala di Hopkins modificata (<http://www.sportsci.org/resource/stats/2002>) dove $d < 0,2$ era trivial, $d = 0,2-0,6$ small, $d = 0,6-1,2$ medium e $d > 1,2$ large. Il livello di significatività è stato fissato a $P < 0,05$ e le analisi sono state effettuate utilizzando il software SPSS 13.0 statistical software (SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

Risultati

Il VO_2max dei soggetti era $51,7 \pm 6,9$ $mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$. I risultati del test di RSA cycling erano: 941 ± 149 W per RSA_{best} , 8111 ± 138 W per RSA_{mean} e $14,0 \pm 4,5\%$ per RSA_{dec} . I risultati del test di RSA running erano: $6,4 \pm 0,3$ $m \cdot s^{-1}$ per RSA_{best} , $6,2 \pm 0,3$ $m \cdot s^{-1}$ per RSA_{mean} e $4,5 \pm 2,3\%$ per RSA_{dec} .

Entrambe le forme di esercizio hanno causato un marcato incremento delle concentrazioni di La^- e H^+ con una concomitante riduzione della concentrazione di HCO_3^- ($P < 0,001$). I parametri ematici non

hanno mostrato differenze tra il test di RSA cycling e quello running con degli effect size small (tabella 4).

Tabella 4. Parametri ematici misurati prima e dopo il test di repeated-sprint ability effettuato pedalando o correndo.

	RSA Cycling test		RSA Running test		Interazione ANOVA	Effect size
	Pre	Post	Pre	Post	p	η^2_p
La ⁻ (mmol·L ⁻¹)	4,4 ± 1,5	14,0 ± 1,7 *	3,2 ± 1,7	12,9 ± 0,6 *	0,791	0,01
H ⁺ (mmol·L ⁻¹)	41,4 ± 1,3	62,7 ± 5,1 *	39,4 ± 2,2	62,0 ± 3,5 *	0,468	0,01
HCO ₃ ⁻ (mmol·L ⁻¹)	21,8 ± 1,6	12,2 ± 1,6 *	22,4 ± 1,6	12,6 ± 1,2 *	0,727	0,05

RSA, repeated-sprint ability; Pre, prima del test; Post, dopo il test; La⁻, lattato; H⁺, idrogenioni; HCO₃⁻, bicarbonati; *, p<0,001, significativamente diverso da Pre.

Non è stata individuata alcuna differenza significativa nei valori di HR ($P > 0,384$) e i valori di effect size erano da trivial a moderate (tabella 5). La RPE overall tendeva ad essere più alta dopo il test di RSA cycling rispetto a dopo il test di RSA running ($P = 0,090$) mentre la RPE leg era significativamente maggiore dopo RSA cycling rispetto a RSA running ($P = 0,018$). Questi risultati sono supportati anche dai valori di effect size large e very large per RPE overall e per RPE leg ($d = 0,59$ e $d = 0,86$). Non è stata individuata alcuna differenza significativa per i valori di RPE chest.

Tabella 5. Differenze nella frequenza cardiaca e nella percezione dello sforzo durante i test di repeated-sprint ability effettuati pedalando e correndo.

	RSA Cycling test	RSA Running test	p value	<i>d</i>
HR media (bpm)	167 ± 13	168 ± 10	0,761	0,08 (trivial)
HR media (% of max)	88,9 ± 3,7	89,5 ± 3,6	0,728	0,16 (small)
HR picco (bpm)	178 ± 11	181 ± 11	0,396	0,23 (small)
HR picco (% of max)	94,8 ± 3,0	96,2 ± 4,8	0,385	0,36 (moderate)
RPE overall (au)	8,5 ± 0,9	7,9 ± 1,2	0,090	0,59 (large)
RPE chest (au)	8,6 ± 0,9	8,1 ± 1,2	0,138	0,46 (moderate)
RPE leg (au)	8,2 ± 0,9	7,3 ± 1,1	0,018	0,86 (very large)

RSA, repeated-sprint ability; *d*, effect size; HR media, media frequenza cardiaca; HR picco, picco di frequenza cardiaca; RPE, rating of perceived exertion.

Sia dopo il test di RSA cycling sia dopo il test di RSA running si osservava una riduzione delle proprietà contrattili di KE. Dopo il test di RSA cycling, si osservava una maggior riduzione del PT di KE ($P < 0,049$) (figura 7), MRTD ($P < 0,012$) e MRTR ($P < 0,028$ ad esclusione delle stimolazioni a 1 Hz) rispetto a quanto accadeva dopo il test di RSA running (tabella 6). Al contrario, il CT di KE diminuiva dopo il test RSA running mentre rimaneva stabile dopo il test di RSA cycling ($P < 0,030$). Inoltre, il HRT di KE aumentava significativamente dopo RSA cycling mentre si riduceva dopo RSA running ($P < 0,014$) (tabella 6). Tutti gli effect size riferiti a tutte le misure delle proprietà contrattili di KE erano large ($\rho\eta^2$ range = 0,27 – 0,84).

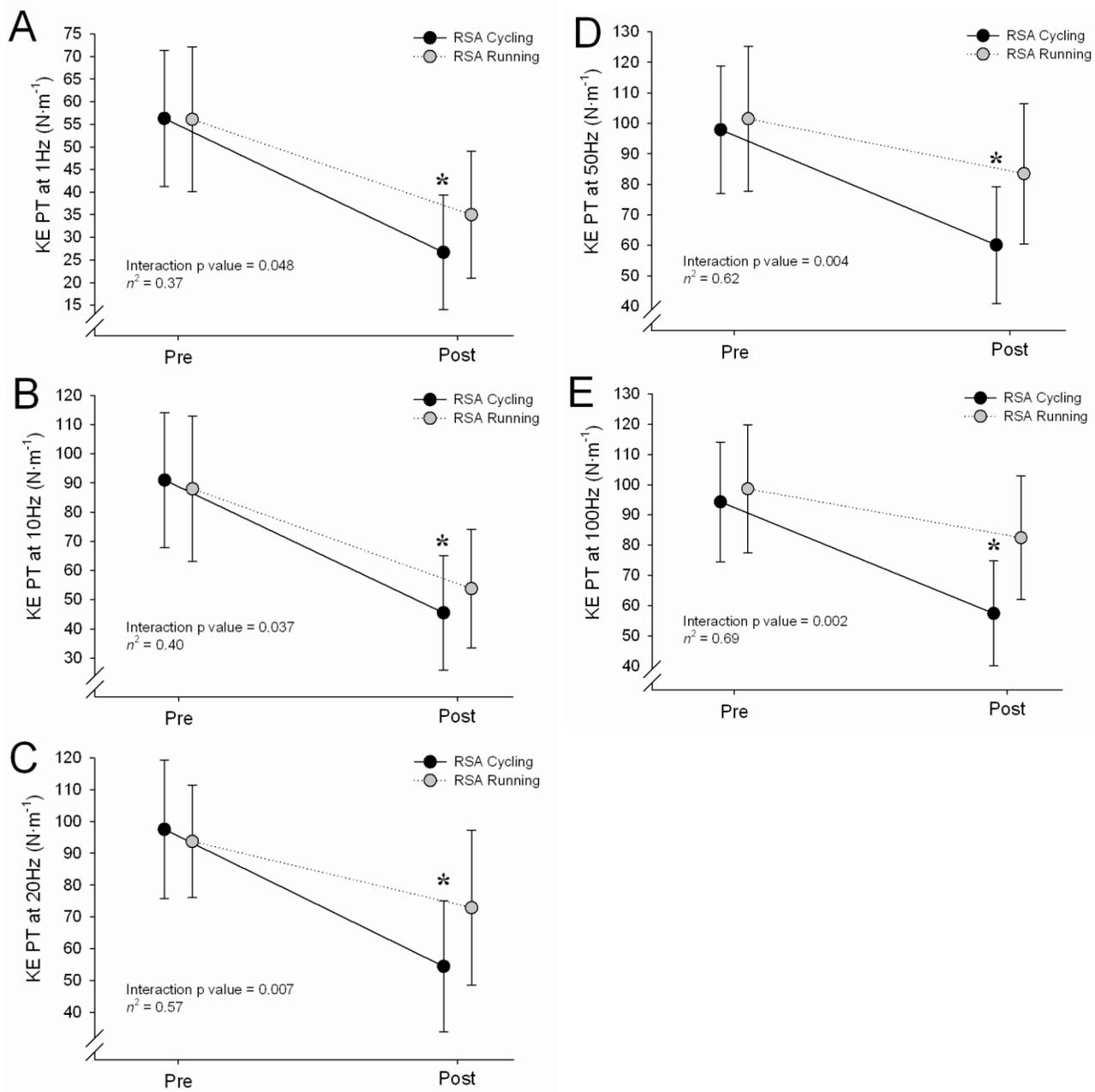


Figura 7. Picco del momento di forza (PT) degli estensori del ginocchio (KE) misurato prima (Pre) e dopo (Post) il test di repeated-sprint ability (RSA) effettuato pedalando (cycling, cerchi neri) o correndo (running, cerchi grigi), tramite stimolazioni a 1 Hz (pannello A), a 10 Hz (pannello B), a 20 Hz (pannello C), a 50 Hz (pannello D) e a 100 Hz (pannello E). *, $P < 0,05$, significativamente minore di tutte le altre condizioni.

Tabella 6. Proprietà contrattili degli estensori del ginocchio determinate utilizzando stimolazioni elettriche single e doppie prima e dopo i test di repeated-sprint ability effettuati pedalando o correndo.

	RSA Cycling test		RSA Running test		Interazione ANOVA	Effect size
	Pre	Post	Pre	Post	p	η^2
<i>Maximal Rate of Torque Development ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)</i>						
1 Hz	1,72 ± 0,52	0,82 ± 0,38 *	1,71 ± 0,50	1,21 ± 0,43	0,008	0,56
10 Hz	1,71 ± 0,54	0,82 ± 0,40 *	1,67 ± 0,51	1,22 ± 0,44	0,011	0,53
20 Hz	2,14 ± 0,56	1,16 ± 0,51 *	2,10 ± 0,45	1,74 ± 0,49	0,002	0,66
50 Hz	2,58 ± 0,63	1,66 ± 0,60 *	2,61 ± 0,62	2,43 ± 0,58	0,001	0,72
100 Hz	2,67 ± 0,46	1,68 ± 0,55 *	2,72 ± 0,62	2,48 ± 0,55	0,001	0,75
<i>Maximal Rate of Torque Relaxation ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)</i>						
1 Hz	1,17 ± 0,28	0,52 ± 0,22	1,20 ± 0,25	0,73 ± 0,33	0,100	0,27
10 Hz	1,79 ± 0,39	0,82 ± 0,38 *	1,76 ± 0,44	1,14 ± 0,47	0,027	0,44
20 Hz	2,01 ± 0,37	1,01 ± 0,41 *	2,01 ± 0,35	1,61 ± 0,53	0,005	0,61
50 Hz	2,10 ± 0,38	1,21 ± 0,40 *	2,09 ± 0,46	1,90 ± 0,48	0,002	0,69
100 Hz	2,08 ± 0,44	1,23 ± 0,37 *	2,14 ± 0,39	1,89 ± 0,45	0,002	0,66
<i>Contraction Time (ms)</i>						
1 Hz	103,6 ± 4,7	101,9 ± 8,4	106,2 ± 4,8	92,4 ± 7,8 *	0,004	0,62
10 Hz	178,2 ± 4,3	178,1 ± 4,8	177,6 ± 5,8	166,1 ± 5,5 *	<0,001	0,77
20 Hz	140,0 ± 4,4	138,4 ± 6,8	137,6 ± 4,3	124,6 ± 4,5 *	<0,001	0,84
50 Hz	125,9 ± 4,9	122,4 ± 6,7	124,6 ± 3,3	110,0 ± 4,5 *	<0,001	0,77
100 Hz	121,7 ± 5,0	115,0 ± 4,6	119,8 ± 4,9	105,7 ± 4,4 *	0,029	0,43
<i>Half Relaxation Time (ms)</i>						
1 Hz	79,8 ± 3,4	96,4 ± 9,5 †	80,2 ± 9,7	77,8 ± 10,1	0,013	0,52
10 Hz	86,0 ± 7,5	101,0 ± 14,7 †	88,1 ± 11,4	80,1 ± 10,1 *	0,008	0,56
20 Hz	83,8 ± 6,7	95,9 ± 12,7 †	83,5 ± 9,0	74,8 ± 7,2 *	<0,001	0,81
50 Hz	81,0 ± 7,6	91,9 ± 12,1 †	78,9 ± 7,0	70,6 ± 6,6 *	<0,001	0,77
100 Hz	81,2 ± 8,8	89,1 ± 12,7 †	78,0 ± 8,0	71,5 ± 10,5 *	0,003	0,65

RSA, repeated-sprint ability; Pre, prima del test; Post, dopo il test; *, $p < 0,05$, significativamente minore di tutte le altre condizioni; †, $p < 0,05$, significativamente maggiore di tutte le altre condizioni.

Le caratteristiche contrattili dei PF non cambiavano in maniera differente tra le due condizioni ($P < 0,231$). Il PT del PF era significativamente ridotto ($P < 0,001$) dopo i test di RSA indipendentemente dalla tipologia di esercizio (figura 8). Il MRTD dei PF rimaneva stabile ($P > 0,110$) così come il MRTR a 20 Hz e 50 Hz ($P > 0,093$). Al contrario, il MRTR a 1 Hz e a 10 Hz diminuiva significativamente dopo entrambi i test di RSA ($P < 0,028$) (tabella 7). Per i CT, è stata individuata

un'interazione significativa solo a 100 Hz ($P = 0,005$) con i valori Post RSA running minori di tutte le altre condizioni. Tutti gli altri CT e HRT erano diminuiti a seguito dei test di RSA indipendentemente dalla tipologia di esercizio ($P < 0,014$) (tabella 7). Gli effect size ($_{p}\eta^2$) erano small per la maggior parte delle misure relative ai PF, con un $_{p}\eta^2$ medium per PT e MRTD a 100 Hz e HRT a 20 Hz e a 50 Hz. Gli unici $_{p}\eta^2$ large per i PF erano per CT a 1 Hz, a 50 Hz e a 100 Hz e HRT a 10 Hz.

I decrementi del PT del KE (range: 16,4% – 52,6%) erano maggiori dei decrementi del PT dei PF (range: 7,7% – 15,3%) (figura 9). Inoltre, il test di RSA cycling causava un calo maggiore del PT dei KE rispetto al test di RSA running. Anche il PT dei PF calava significativamente dopo i test di RSA ma le differenze tra cycling e running non erano significative.

Tutti i rapporti dei PT dei KE diminuivano significativamente dopo i test di RSA ($P < 0,001$), ma le differenze tra le due tipologie di esercizio non erano significative ($P > 0,129$) (tabella 8). Gli effect size per il rapporto 20/50 Hz dei KE era large ($_{p}\eta^2 = 0,24$), per il rapporto 20/100 Hz era moderate ($_{p}\eta^2 = 0,10$), mentre per tutti gli altri rapporti erano small. Al contrario, i rapporti dei PT dei PF a 10/100 Hz, 20/50 Hz e 20/100 Hz calavano significativamente solo dopo il test di RSA cycling ($P < 0,041$). Gli effect size ($_{p}\eta^2$) per i rapporti dei PF 10/50 Hz, 10/100 Hz, 20/50 Hz e 20/100 Hz erano large.

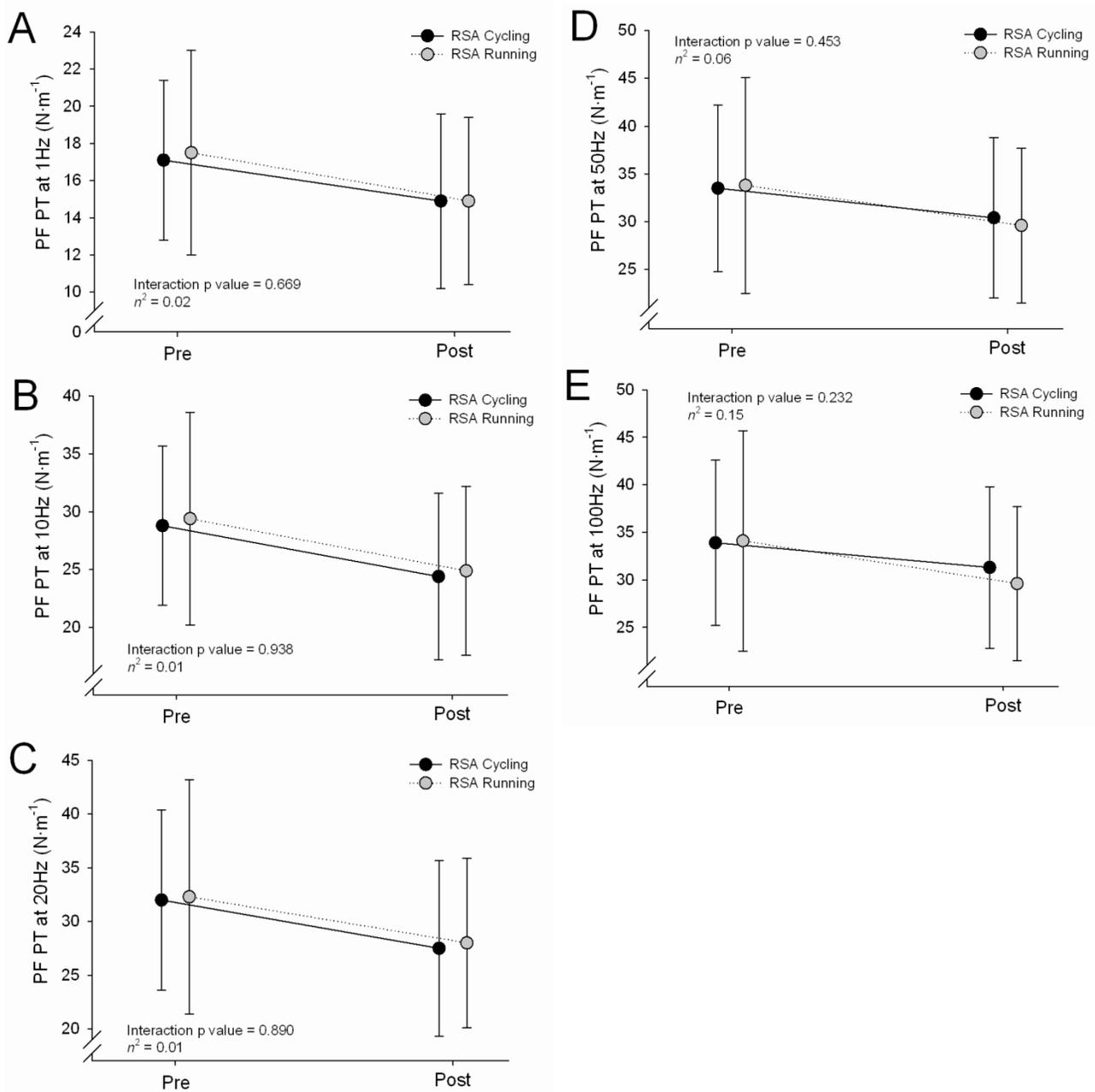


Figura 8. Picco del momento di forza (PT) dei flessori plantari (PF) misurato prima (Pre) e dopo (Post) il test di repeated-sprint ability (RSA) effettuato pedalando (cycling, cerchi neri) o correndo (running, cerchi grigi), tramite stimolazioni a 1 Hz (panello A), a 10 Hz (panello B), a 20 Hz (panello C), a 50 Hz (panello D) e a 100 Hz (panello E).

Tabella 7. Proprietà contrattili dei flessori plantari determinate tramite l'utilizzo di stimolazioni elettriche single o doppie prima e dopo del test di repeated-sprint ability effettuato pedalando o correndo.

	RSA Cycling test		RSA Running test		Interazione ANOVA	Effect size
	Pre	Post	Pre	Post	p	$p\eta^2$
<i>Maximal Rate of Torque Development ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)</i>						
1 Hz	1,98 ± 0,42	1,92 ± 0,49	2,01 ± 0,59	1,97 ± 0,47	0,892	0,01
10 Hz	1,98 ± 0,42	1,96 ± 0,47	2,01 ± 0,58	1,98 ± 0,48	0,970	0,01
20 Hz	2,71 ± 0,65	2,58 ± 0,64	2,71 ± 0,89	2,61 ± 0,63	0,820	0,01
50 Hz	3,20 ± 0,82	3,19 ± 0,78	3,21 ± 1,08	3,18 ± 0,77	0,879	0,01
100 Hz	3,28 ± 0,85	3,32 ± 0,80	3,28 ± 1,15	3,25 ± 0,79	0,636	0,03
<i>Maximal Rate of Torque Relaxation ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)</i>						
1 Hz	1,43 ± 0,43	1,20 ± 0,46	1,47 ± 0,51	1,22 ± 0,50	0,843	0,01
10 Hz	2,08 ± 0,52	1,98 ± 0,69	2,11 ± 0,67	1,97 ± 0,67	0,776	0,01
20 Hz	2,20 ± 0,59	2,20 ± 0,66	2,29 ± 0,70	2,28 ± 0,69	0,925	0,01
50 Hz	2,35 ± 0,67	2,41 ± 0,64	2,36 ± 0,72	2,49 ± 0,68	0,596	0,03
100 Hz	2,32 ± 0,61	2,55 ± 0,62	2,39 ± 0,72	2,53 ± 0,67	0,245	0,15
<i>Contraction Time (ms)</i>						
1 Hz	132,2 ± 11,1	120,5 ± 7,9	132,1 ± 7,5	117,8 ± 7,5	0,159	0,21
10 Hz	202,6 ± 8,6	190,4 ± 7,7	202,0 ± 3,3	191,5 ± 9,8	0,583	0,04
20 Hz	166,4 ± 8,9	150,8 ± 6,5	166,7 ± 5,3	149,8 ± 9,0	0,809	0,01
50 Hz	153,7 ± 10,1	137,4 ± 5,8	154,4 ± 6,4	134,0 ± 7,1	0,112	0,26
100 Hz	150,8 ± 9,7	133,9 ± 7,0	152,6 ± 6,4	129,9 ± 6,6 *	0,005	0,60
<i>Half Relaxation Time (ms)</i>						
1 Hz	88,7 ± 9,7	82,8 ± 10,7	84,3 ± 7,3	80,0 ± 10,0	0,609	0,03
10 Hz	91,6 ± 8,2	75,4 ± 6,6	88,7 ± 6,1	74,5 ± 5,9	0,204	0,17
20 Hz	95,0 ± 7,9	75,3 ± 6,9	91,7 ± 5,5	73,9 ± 5,8	0,272	0,13
50 Hz	97,5 ± 8,7	74,5 ± 6,3	92,7 ± 5,1	71,8 ± 5,9	0,263	0,14
100 Hz	95,4 ± 8,2	73,2 ± 6,6	91,1 ± 5,7	69,8 ± 5,9	0,594	0,03

RSA, repeated-sprint ability; Pre, prima del test; Post, dopo il test; *, $p < 0,05$, significativamente minore di tutte le altre condizioni.

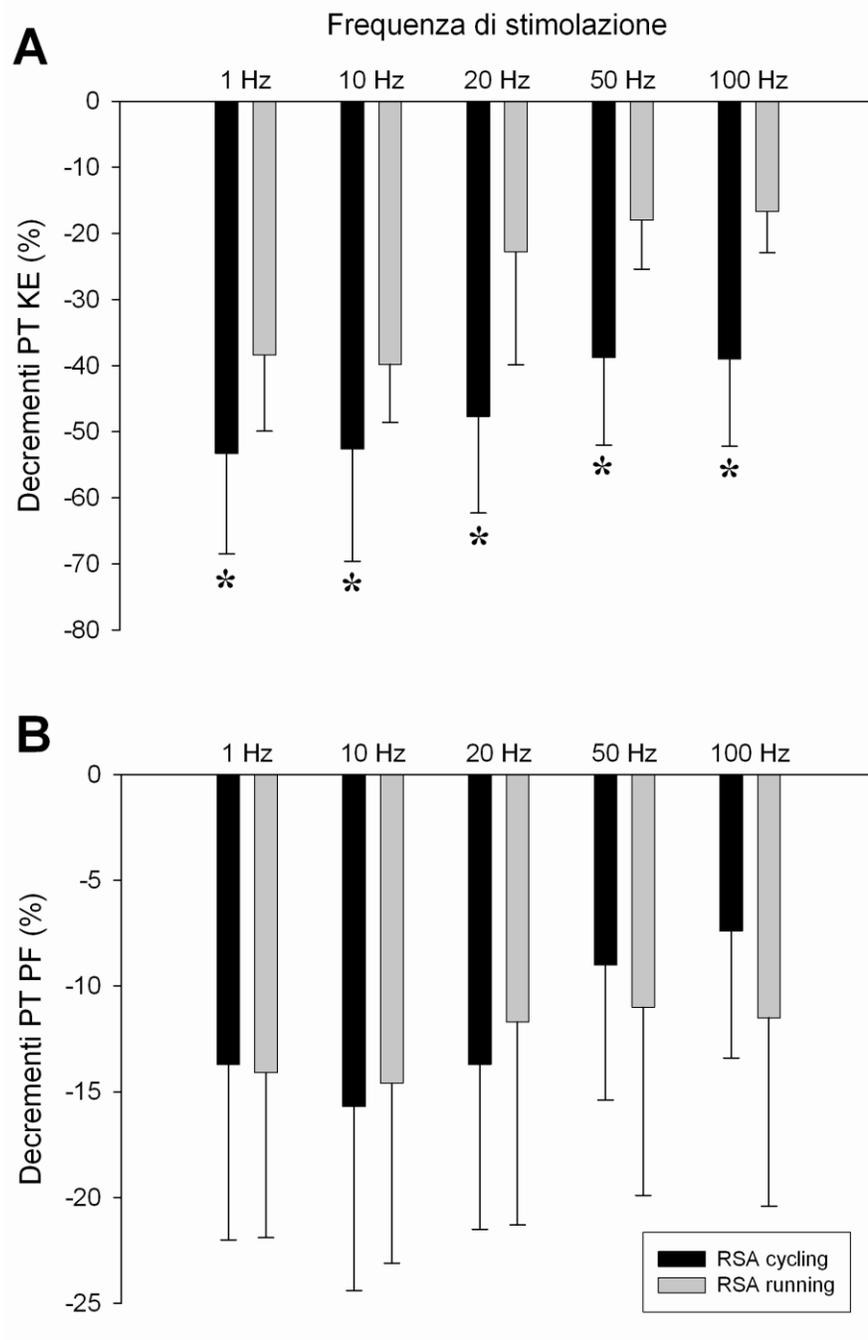


Figura 9. Decrementi percentuali del picco del momento di forza (PT) degli estensori del ginocchio (KE, pannello A) e dei flessori plantari (PF, pannello B) a seguito dei test di repeated-sprint ability (RSA) effettuato pedalando (cycling, barre nere) o correndo (running, barre grigie), tramite stimolazioni a 1 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 50 Hz e 100 Hz. *, $P < 0,05$, significativamente diverso dalla condizione RSA running.

Table 8. Rapporti low- vs high-frequency degli estensori del ginocchio e dei flessori plantari calcolati utilizzando diverse tipologie di stimolazione elettrica prima e dopo del test di repeated-sprint ability effettuato pedalando o correndo.

	RSA Cycling test		RSA Running test		ANOVA	Effect
	Pre	Post	Pre	Post	interaction	size
					p value	η^2
<i>Knee Extensors</i>						
Ratio PT 1/50 Hz	0,57 ± 0,05	0,43 ± 0,09	0,55 ± 0,07	0,41 ± 0,07	0,992	0,01
Ratio PT 1/100 Hz	0,59 ± 0,06	0,45 ± 0,11	0,56 ± 0,07	0,41 ± 0,08	0,817	0,01
Ratio PT 10/50 Hz	0,93 ± 0,09	0,70 ± 0,11	0,87 ± 0,12	0,64 ± 0,13	0,944	0,01
Ratio PT 10/100 Hz	0,96 ± 0,10	0,74 ± 0,15	0,89 ± 0,13	0,64 ± 0,14	0,749	0,01
Ratio PT 20/50 Hz	0,99 ± 0,03	0,84 ± 0,07	0,94 ± 0,11	0,87 ± 0,08	0,130	0,24
Ratio PT 20/100 Hz	1,03 ± 0,04	0,88 ± 0,13	0,96 ± 0,10	0,87 ± 0,10	0,335	0,10
<i>Plantar Flexors</i>						
Ratio PT 1/50 Hz	0,51 ± 0,04	0,49 ± 0,05	0,52 ± 0,05	0,50 ± 0,03	0,591	0,05
Ratio PT 1/100 Hz	0,51 ± 0,04	0,47 ± 0,05	0,52 ± 0,06	0,50 ± 0,04	0,188	0,14
Ratio PT 10/50 Hz	0,86 ± 0,04	0,80 ± 0,04	0,87 ± 0,04	0,84 ± 0,05	0,146	0,23
Ratio PT 10/100 Hz	0,85 ± 0,04	0,78 ± 0,05 *	0,87 ± 0,05	0,84 ± 0,06	0,040	0,36
Ratio PT 20/50 Hz	0,95 ± 0,03	0,90 ± 0,04 *	0,95 ± 0,02	0,94 ± 0,03	0,003	0,66
Ratio PT 20/100 Hz	0,94 ± 0,03	0,88 ± 0,04 *	0,95 ± 0,02	0,94 ± 0,04	0,001	0,64

RSA, repeated-sprint ability; PT, picco del momento di forza; Pre, prima del test; Post, dopo del test; *, $p < 0,05$, significativamente diverso da tutte le altre condizioni.

Discussione

Lo scopo di questo studio era quello di investigare le differenze nella fatica periferica indotta da un test di RSA effettuato pedalando o correndo in due gruppi muscolari usando diverse tipologie di stimolazione elettrica. I risultati indicano che il test di RSA cycling induce un maggior decremento delle proprietà contrattili dei KE a tutte le frequenze di stimolazione. Al contrario, non sono state individuate differenze importanti nell'affaticamento dei PF. Questi risultati sono anche supportati dalla maggior percezione dello sforzo locale (RPE leg) a seguito del test RSA cycling e dalla tendenza alla maggior percezione dello sforzo generale (RPE overall). Tutti gli indicatori di low-frequency fatigue dei KE (rapporti di PT) erano ridotti in maniera simile tra le due condizioni. Alcuni rapporti dei PF (10/100 Hz, 20/50 Hz e 20/100 Hz) suggerivano la maggior presenza di fatica di tipo low-frequency a seguito del test RSA cycling. Tutte queste differenze non erano accompagnate da alterazioni a livello ematico o risposte cardiache differenti tra le due condizioni.

La performance nei test di sprint ripetuti: pedalare vs correre

Le performance registrate durante i test di RSA del presente studio sono in linea con quanto precedentemente riportato in letteratura (Girard *et al.*, 2011). La potenza sviluppata nel corso dei test di RSA cycling dai nostri soggetti maschi moderatamente attivi è maggiore (RSA_{mean} , 30-50%) di quanto riportato per atlete femmine praticanti sport di squadra (Bishop *et al.*, 2004a) ma minore (RSA_{mean} , 20%) di quanto riportato per atleti maschi praticanti sempre sport di squadra (Fitzsimons *et al.*, 1993). Allo stesso modo, la performance di RSA running era minore (RSA_{mean} , 5-10%) rispetto a quella riportata per atleti maschi praticanti sport di squadra (Fitzsimons *et al.*, 1993; Dupont *et al.*, 2010). Il calo di performance osservato nel corso dei test di RSA era maggiore ($P < 0,001$) durante il test di RSA cycling rispetto a RSA running (14,0% vs 4,5%, rispettivamente). Questi risultati confermano quanto precedentemente riportato in letteratura (Bishop, 2012) e suggeriscono un possibile maggior affaticamento muscolare nel corso dell'esercizio svolto pedalando.

Risposte fisiologiche e percezione dello sforzo

Entrambi i test di RSA hanno provocato una significativa alterazione a livello ematico ($P < 0,001$). L'elevato incremento di accumulo di La^- e la concomitante riduzione della concentrazione di HCO_3^- confermano l'attivazione della glicolisi anaerobica al fine di soddisfare le richieste energetiche delle due forme di esercizio. I livelli di concentrazione ematica di La^- , HCO_3^- e H^+ sono simili a quanto precedentemente riportato a seguito di esercizi simili (Edge *et al.*, 2006; Perrey *et al.*, 2010). Il maggior

calo prestativo durante il test di RSA cycling non si rispecchiava nelle risposte dei parametri ematici o nelle risposte della HR (media e picco di HR simile tra le due condizioni). Questi risultati sono supportati dalla simile RPE chest riportata tra le due condizioni. Al contrario, RPE cycling induceva una maggior percezione dello sforzo locale (RPE leg = 8,2 vs 7,3 au, P = 0,018) e la tendenza ad una maggior percezione dello sforzo generale (RPE leg = 8,5 vs 7,9 au, P = 0,009). I valori di RPE maggiori e il maggior decremento di performance nel corso dell'esercizio effettuato pedalando, costituiscono il primo tassello di evidenza del maggior affaticamento neuromuscolare nel corso di questa tipologia di esercizio rispetto agli sprint effettuati correndo (Bundle and Weyand, 2012).

La fatica neuromuscolare degli estensori del ginocchio

Si ritiene che i meccanismi che favoriscono l'evolversi dell'affaticamento a livello neuromuscolare sono specifici rispetto alle richieste dell'esercizio proposto (Bishop, 2012). Conseguentemente, lo sviluppo della fatica potrebbe essere diverso a seconda della tipologia di esercizio (e.g. pedalare vs correre) proposta. Alcuni studi precedenti hanno stabilito che la fatica indotta da una prova di RSA è prevalentemente di tipo periferico (Racinais *et al.*, 2007; Perrey *et al.*, 2010; Bishop, 2012; Girard *et al.*, 2013) e questo aspetto è stato particolarmente indagato nel presente studio tramite l'applicazione di stimolazioni elettriche a diverse frequenze (dallo stimolo singolo a coppie di stimoli rilasciate a 100 Hz).

Dai risultati della presente ricerca è stato possibile identificare la presenza di fatica di tipo periferico grazie al marcato decremento delle proprietà contrattili del muscolo. Il calo di PT, MRTD e MRTR ad alta e a bassa frequenza di stimolazione confermano la presenza di fatica sia di tipo high-frequency sia di tipo low-frequency nei KE. Per questi motivi sia una riduzione di eccitabilità muscolare o di propagazione del potenziale d'azione sul sarcomero o sui tubuli a t sia un fallimento del meccanismo di accoppiamento eccitamento-contrazione sono meccanismi fisiologici che possono spiegare la tipologia di fatica periferica che si genera a seguito degli esercizi di RSA (Jones, 1996).

I cali di PT dei KE dopo il test di RSA running sono paragonabili a quanto riportato a seguito di una prova di 400 m di sprint (1 Hz ~35-40% e 100 Hz ~15%) i quali sono maggiori di quanto avviene a seguito di sprint più brevi come i 100 m o i 200 m (Tomazin *et al.*, 2012). Tuttavia, la prova di RSA cycling ha indotto una maggior riduzione dei PT dei KE rispetto a quanto succedeva nella prova di corsa. I maggiori livelli di fatica neuromuscolare periferica sono anche confermati dai cambiamenti di CT e HRT dei KE (CT e HRT erano diminuiti dopo RSA running mentre CT era stabile e HRT era

aumentata dopo RSA cycling). Le differenze tra le due modalità di esercizio potrebbero essere spiegate dal maggior tempo di applicazione della forza all'interno della pedalata rispetto a quanto avviene nella corsa. È importante notare che il duty factor (la frazione del tempo totale in cui l'arto inferiore è impegnato a sviluppare forza sul pedale o sul terreno) è doppio (0,50 vs 0,24) nella pedalata rispetto alla corsa (Bundle and Weyand, 2012). Questo aspetto potrebbe influenzare negativamente la perfusione dei KE dato che è noto che il flusso ematico è limitato nel corso di contrazioni prolungate anche quando queste sono effettuate ad una intensità relativamente bassa (~25% MVC) (Sjogaard *et al.*, 1988). Inoltre, è stato riportato che una riduzione del flusso ematico induce un maggior livello di fatica di tipo periferico (Cole and Brown, 2000).

La fatica neuromuscolare dei flessori plantari

La riduzione dei PT sia ad alta che a bassa frequenza suggerisce la presenza sia della high-frequency sia della low-frequency fatigue nei PF. Tuttavia, non è stata individuata alcuna differenza significativa tra le due condizioni di RSA. Il calo di PT dei PF (~12%) era simile a quanto precedentemente riportato in uno studio che aveva investigato la fatica in un esercizio di RSA effettuato correndo (Perrey *et al.*, 2010).

Il minor affaticamento dei PF rispetto ai KE è confermato dalla minor riduzione dei PT, dalla mancanza di cambiamenti di MRTD e dal calo di MRTR verificatori solo a 1 Hz e a 10 Hz. Inoltre, sia i CT sia gli HRT dei PF erano diminuiti a seguito dei test di RSA. Un possibile causa di queste differenze potrebbe risiedere nella differente composizione di fibre muscolari dei due gruppi muscolari. Infatti, i PF sono generalmente caratterizzati da un'elevata percentuale di fibre di tipo I che sono notoriamente molto resistenti alla fatica. Un'altra possibile causa potrebbe essere il minor contributo relativo dei PF nel corso degli sprint, rispetto a quanto succede nella corsa a bassa intensità (Novacheck, 1998). Tuttavia, nel presente studio non è stata effettuata alcuna misura diretta dell'attività muscolare dei KE e dei PF e questa ipotesi andrebbe verificata in futuro. I risultati sui PF di questo studio differiscono da quanto riportato a seguito di un esercizio di corsa molto prolungato (Martin *et al.*, 2010). Infatti, a seguito di 24 ore di corsa è stato riportato un affaticamento simile tra KE e PF (Martin *et al.*, 2010). I risultati di questo studio non supportano anche alcune evidenze preliminari che indicavano i PF come maggiormente sensibili all'affaticamento rispetto ai KE (Behm and St-Pierre, 1997). Le differenze nei protocolli utilizzati potrebbero spiegare le discrepanze tra i vari studi.

Effetto della fatica sui rapporti low- vs high-frequency

In letteratura sono stati proposti numerosi rapporti low- vs high-frequency per la quantificazione della low-frequency fatigue (Jones *et al.*, 1989; Girard *et al.*, 2008; Verges *et al.*, 2009; Iguchi and Shields, 2010; Perrey *et al.*, 2010). Tuttavia, al momento non esiste un'indicazione su quale sia il migliore da utilizzare. In questo studio sono stati calcolati dei rapporti tra stimoli singoli e doppi (1/50 Hz e 1/100 Hz) e dei rapporti tra stimoli doppi rilasciati a bassa ed alta frequenza (10/50 Hz, 10/100 Hz, 20/50 Hz e 20/100 Hz).

In generale si ritiene che la low-frequency fatigue sia più presente a seguito di esercizi caratterizzati da contrazioni eccentriche (Jones *et al.*, 1989) o esercizi ad alta intensità che prevedano il ciclo stiramento-accorciamento (e.g. sprint di corsa) (Martin *et al.*, 2005; Girard *et al.*, 2006). Per questo motivo, in questo studio era stata ipotizzata una maggior presenza di fatica di tipo low-frequency a seguito di un test di RSA correndo rispetto ad un test di RSA effettuato pedalando. Tuttavia, contrariamente alla nostra ipotesi i risultati di questo studio e quelli riportati da Iguchi *et al.* (2008; 2010) non supportano questa assunzione. Non è stata osservata una maggior riduzione dei rapporti dei KE e dei PF a seguito del test di RSA running non confermando la maggior presenza di low-frequency fatigue a seguito di questo esercizio.

D'altra parte, i PF hanno mostrato una maggior presenza di low-frequency fatigue dopo il test di RSA cycling rispetto al test di RSA running. La presenza di maggior low-frequency fatigue è confermata da tutti i rapporti (ad esclusione di 10/50 Hz) calcolati utilizzando stimoli doppi. Al contrario, i rapporti calcolati utilizzando gli stimoli singoli e quelli doppi non erano diversamente influenzati dalla tipologia di esercizio. Questi risultati sono in linea con altre evidenze che hanno suggerito una maggior sensibilità dei stimoli elettrici doppi rispetto a quelli singoli per la quantificazione della fatica neuromuscolare (Verges *et al.*, 2009).

In conclusione, gli esercizi di RSA inducono un maggior affaticamento dei KE rispetto ai PF. Questo aspetto andrebbe considerato nella preparazione degli atleti coinvolti in discipline sportive che necessitano l'effettuazione di sprint. Il test di RSA cycling ha indotto un maggior deterioramento delle caratteristiche contrattili dei KE e ha causato una maggior presenza di fatica di tipo low-frequency nei PF. Il maggior affaticamento dei KE dopo RSA cycling potrebbe essere legato al differente duty factor (e conseguentemente a differenze nel flusso ematico locale) che caratterizza le due forme di esercizio. Il maggior affaticamento dei KE rispetto ai PF potrebbe essere parzialmente legato alla differente composizione di fibre dei due gruppi muscolari o al differente livello di attivazione muscolare.

Capitolo 5

RIPETIBILITA' DELLA FATICA NEUROMUSCOLARE PERIFERICA INDOTTA DA UN ESERCIZIO DI CORSA INTERMITTENTE AD ALTA INTENSITA'

Introduzione

La fatica è un fenomeno multifattoriale che può essere definito come: “un acuto deterioramento della performance che include sia un aumento della percezione dello sforzo necessaria per produrre una determinata forza o potenza sia eventualmente un’incapacità di produrre la massima forza o potenza” (Gandevia, 2001). La fatica è una delle problematiche maggiori per gli atleti dato che può contribuire direttamente al calo della performance negli sport di endurance (Marcora *et al.*, 2008). Recentemente, un numero sempre crescente di studi si è occupato di quantificare il livello di affaticamento neuromuscolare a seguito di esercizi diversi per tipologia (e.g. corsa vs pedalata), per tipologia di contrazione muscolare prevalente (e.g. concentrica vs eccentrica), per modalità di attivazione (volontaria o indotta da stimolazione elettrica) (Place *et al.*, 2007), per durata e intensità (Millet and Lepers, 2004). La fatica può essere classificata come centrale quando la sua origine è prossimale rispetto alla giunzione neuromuscolare e periferica quando la sua origine è distale rispetto alla giunzione stessa (Gandevia, 2001). Il miglioramento delle tecniche di elettrostimolazione consentono oggi la quantificazione della fatica periferica indipendentemente da quella centrale. La fatica periferica può essere divisa in high- e low-frequency (Jones, 1996). La high-frequency fatigue è definita come la perdita di forza utilizzando alte frequenze di stimolazione ed è una tipologia di fatica che si recupera abbastanza velocemente. Si ritiene che la high-frequency fatigue sia causata da una alterazione della propagazione del potenziale d’azione sul sarcolemma o sui tubuli t (Jones, 1996). La low-frequency fatigue (anche chiamata long-lasting fatigue) è caratterizzata da un recupero molto lento (ore o addirittura giorni) (Jones, 1996) ed è associata ad un fallimento del processo eccitamento-contrazione (Perrey *et al.*, 2010).

Il gold-standard per la valutazione delle funzioni muscolari a livello periferico prevede l’utilizzo di treni di impulsi sopramassimali che inducono contrazioni di tipo tetanico (Edwards *et al.*, 1977). Tuttavia, questa metodologia è particolarmente dolorosa e quindi il suo utilizzo pratico è abbastanza limitato (Martin *et al.*, 2004). E’ stato anche osservato che è possibile quantificare il calo prestativo muscolare sia utilizzando contrazioni tetaniche sia utilizzando metodi alternativi meno invasivi (Martin *et al.*, 2004). Inoltre, altri studi hanno evidenziato che l’utilizzo di coppie di stimoli sono un valido surrogato delle contrazioni tetaniche considerate il gold-standard (Verges *et al.*, 2009).

Ad oggi alcuni studi si sono occupati di verificare la ripetibilità delle proprietà contrattili del muscolo (determinate tramite l’utilizzo di stimolazioni) a riposo (Todd *et al.*, 2004; Morton *et al.*,

2005; Place *et al.*, 2007). Questi studi hanno dimostrato che la ripetibilità in queste condizioni è buona (sono stati riportati buoni valori di CV). Solo uno studio ha determinato la ripetibilità delle proprietà contrattili del muscolo in condizioni di fatica. Tuttavia, la tipologia di esercizio affaticante utilizzata non può essere considerata sport-specifica nella maggior parte dei casi. Infatti, il protocollo prevedeva l'utilizzo di una contrazione isometrica massimale prolungata (2 minuti) (Place *et al.*, 2007). Nel caso in cui si volesse utilizzare la stimolazione elettrica per la quantificazione della fatica periferica nel monitoraggio degli atleti, sarebbe necessario effettuare degli studi metodologici che stabiliscano la ripetibilità della fatica periferica causata da esercizi maggiormente specifici rispetto alla disciplina sportiva.

Lo scopo di questo studio era quello di verificare la ripetibilità della funzionalità neuromuscolare periferica degli estensori del ginocchio (KE) in condizioni di riposo e in condizioni di fatica utilizzando le stimolazioni elettriche transcutanee. La definizione della ripetibilità in questo contesto, rappresenta un primo passo per l'eventuale introduzione di questa metodica nel monitoraggio degli atleti. Nel presente studio, sono state utilizzate stimolazioni elettriche singole e doppie (per la definizione della funzionalità periferica) prima e dopo l'esecuzione di un esercizio di corsa intermittente ad alta intensità. L'esercizio di corsa intermittente ad alta intensità è stato scelto al fine di riprodurre un affaticamento muscolare simile a quello che i giocatori hanno nel corso della prestazione. Infatti, in questa tipologia di esercizio è presente un marcato contributo sia aerobico sia anaerobico, ed è necessaria la produzione di buoni livelli di forza muscolare (Bangsbo, 1994a).

Materiali e Metodi

Lo studio è stato disegnato per verificare la ripetibilità della funzionalità neuromuscolare dei KE sia in condizioni basali sia di fatica. Per questo, i soggetti sono stati sottoposti a tre sessioni di valutazioni (T1, T2 e T3) a distanza di 7 giorni una dall'altra. Le sessioni di test sono state effettuate tutte alla stessa ora della giornata. Il protocollo è stato scelto al fine di verificare la ripetibilità con o senza una seduta preliminare di familiarizzazione. Durante ognuna delle sessioni, le proprietà contrattili dei KE sono state determinate utilizzando delle stimolazioni elettriche prima (PRE) e dopo (POST) un esercizio di corsa intermittente ad alta intensità. Le misure POST sono state effettuate 90 secondi dopo la fine dell'esercizio intermittente.

Soggetti

Lo studio è stato condotto su 16 giovani giocatori di calcio (età: 18 ± 1 anni, altezza 178 ± 5 cm, peso 68 ± 8 kg). Prima di iniziare lo studio i soggetti hanno firmato il consenso informato di partecipazione e la ricerca è stata approvata dall'Institutional Review Board di Mapei Sport. I soggetti erano sani e si allenavano regolarmente 3 volte alla settimana (oltre ad una partita ufficiale). I risultati relativi ai 10 soggetti che hanno completato tutte le tre sessioni di test sono stati utilizzati per l'analisi statistica.

Misura della funzionalità contrattile del muscolo

Le proprietà contrattili del muscolo sono state misurate sui KE destri con i soggetti seduti su una leg extension. Il ginocchio e l'anca erano fissate a 90° (0° = estensione completa del ginocchio), e alcune cinture di Velcro erano posizionate sulla gamba e sull'anca per minimizzare i movimenti. I soggetti dovevano impugnare la seduta nel corso delle contrazioni per stabilizzare ulteriormente la posizione. La risposta meccanica del muscolo è stata registrata tramite l'utilizzo di una cella di carico (AIP, Varese, Italia) connessa ad un sistema di acquisizione di segnali (BIOPAC MP100, BIOPAC System Inc, Santa Barbara, CA) con una frequenza di campionamento di 500 Hz. La cella di carico era stata calibrata utilizzando dei pesi di riferimento certificati. Gli stimoli singoli (1 Hz) e quelli doppi (10 Hz, 100-ms di intervallo e 100 Hz, 10-ms di intervallo) venivano prodotti tramite l'utilizzo di un impulso ad onda quadra ($200 \mu s$) inviato da uno stimolatore di corrente continua (Digitimer DS7AH, Hertfordshire, UK) ad alto voltaggio (massimo voltaggio = 400 V). Il nervo femorale veniva stimolato utilizzando due elettrodi adesivi (Compex, Ecublens, Svizzera). Il catodo (5×5 cm) era posizionato nel triangolo femorale mentre l'anodo (10×5 cm) sulla linea del gluteo. Il posizionamento degli elettrodi veniva effettuato dallo stesso operatore in tutte le sessioni di test. A riposo, la loro posizione veniva segnata sulla pelle prima di rimuoverli. A seguito del test intermittente, la pelle veniva asciugata e gli elettrodi venivano riposizionati sulla pelle nello stesso punto.

La corrente necessaria per stimolare al massimo i KE era determinata tramite graduali incrementi di amperaggio (10 mA) fino a quando si verificava un plateau nel picco del momento di forza generato dalla twitch. Successivamente, l'intensità veniva ulteriormente aumentata del 20% e mantenuta costante nel corso dell'intera sessione di valutazione (media intensità = 188 ± 56 mA, range = 86 – 312 mA). Prima dell'inizio di ogni sessione l'intensità ottimale veniva ri-definita. Per ognuna delle tipologie di stimolazioni elettriche venivano calcolati i seguenti parametri: picco del momento di forza (PT), Maximal Rate of Torque Development (MRTD) (i.e. valore più elevato della derivata prima

del segnale di momento di forza espresso), Maximal Rate of Torque Relaxation (MRTR), (i.e. valore più basso della derivata prima del segnale di momento di forza espresso). Veniva anche calcolato il rapporto tra i PT ottenuto a 10 Hz rispetto a quello ottenuto a 100 Hz (10/100 Hz) come indicatore di low-frequency fatigue.

L'esercizio di corsa intermittente ad alta intensità

I soggetti effettuavano un riscaldamento costituito da 5 minuti di corsa a bassa intensità, seguiti da 3 accelerazioni al 70% del proprio massimale su 50 m con un minuto di recupero tra ogni accelerazione. Il test di corsa intermittente ad alta intensità (HIT) richiedeva ai soggetti di effettuare delle corse a navetta su un percorso di 25 + 25 m con un cambio di direzione di 180° da effettuarsi in 10 secondi seguiti da 20 secondi di recupero passivo. I soggetti dovevano seguire una lepre acustica che gli imponeva una velocità media di corsa di 18 km·h⁻¹. Le corse da effettuarsi erano 10 e la durata totale del test era di 5 minuti.

Analisi statistica

I valori vengono presentati come media \pm SD. L'ANOVA per misure ripetute è stata utilizzata per individuare le differenze sistematiche nelle tre sessioni di test. La correzione di Huyhn-Feldt veniva utilizzata quando l'assunzione di sfericità veniva violata (Atkinson and Nevill, 1998). La ripetibilità relativa delle misure veniva determinata tramite il calcolo del coefficiente di correlazione di interclasse (Interclass Correlation Coefficient, ICC) (2, 1) (Shrout and Fleiss, 1979). Un valore di ICC pari a 0,90 o superiore veniva considerato high, tra 0,80 e 0,90 moderate e sotto 0,80 low (Vincent, 1995). È stata anche determinata la ripetibilità relativa al fine di indagare la variabilità intra-soggettiva nel corso delle misure ripetute (i.e. typical error) (Atkinson and Nevill, 1998). Il typical error veniva calcolato come la deviazione standard delle differenze tra due misure / $\sqrt{2}$. Sia per ICC sia per il typical error sono stati calcolati anche i 95% dei limiti di confidenza. Il livello di significatività è stato fissato a $P < 0,05$.

Risultati

La media \pm SD dei PT dei KE determinati utilizzando diverse tipologie di stimolazioni elettriche nel corso delle varie sessioni di test sono presentate nella figura 10. I cali di PT, i valori di MRTD e MRTR sono presentati nella tabella 9.

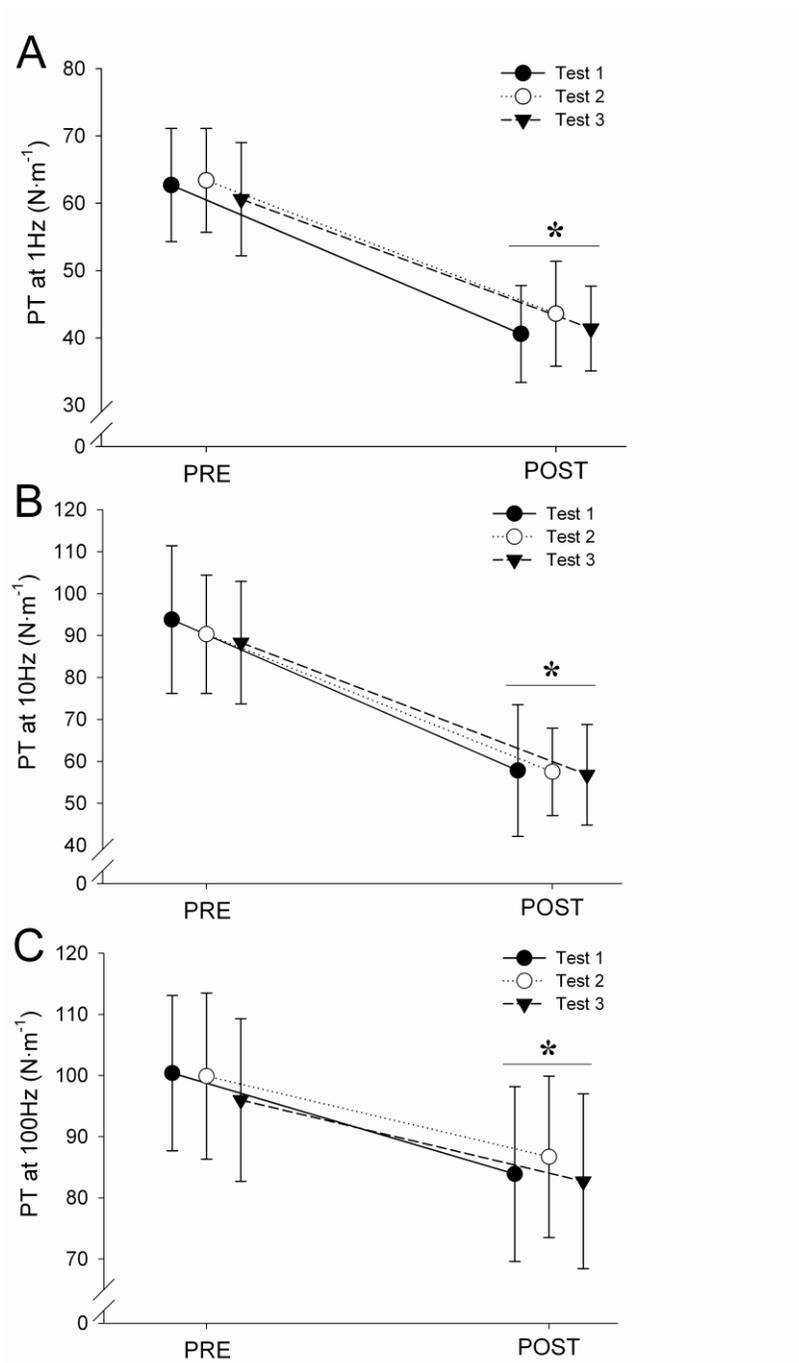


Figura 10. Valori del picco del momento di forza (PT) ottenuti tramite l'utilizzo di stimolazioni elettriche a 1 Hz (pannello A), 10 Hz (pannello B) e 100 Hz (pannello C), prima (PRE) e dopo (POST) il test di corsa intermittente effettuato nelle tre sessioni di test. *, $P < 0,001$, significativamente minore dei valori PRE.

Tabella 9. Proprietà contrattili degli estensori del ginocchio determinate tramite l'utilizzo di stimolazioni elettriche single e doppie nel corso delle tre sessioni di valutazione.

	Test 1	Test 2	Test 3
<i>1 Hz</i>			
PT decremento (%)	-35,2 ± 8,3	-31,1 ± 7,9	-31,5 ± 7,6
PRE MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	1,21 ± 0,19	1,28 ± 0,16	1,20 ± 0,16
POST MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,84 ± 0,16	0,91 ± 0,11	0,85 ± 0,12
MRTD decremento (%)	-30,0 ± 5,9	-28,9 ± 6,5	-28,8 ± 6,6
PRE MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,80 ± 0,13	0,78 ± 0,13	0,75 ± 0,12
POST MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,55 ± 0,14	0,52 ± 0,13	0,53 ± 0,09
MRTR decremento (%)	-30,9 ± 15,4	-32,3 ± 15,7	-28,6 ± 10,3
<i>10 Hz</i>			
PT decremento (%)	-38,1 ± 11,7	-36,1 ± 7,8	-35,8 ± 6,7
PRE MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	1,20 ± 0,17	1,23 ± 0,22	1,14 ± 0,23
POST MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,83 ± 0,21	0,86 ± 0,19	0,80 ± 0,19
MRTD decremento (%)	-31,5 ± 11,1	-29,5 ± 7,6	-29,4 ± 10,1
PRE MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	1,16 ± 0,30	1,11 ± 0,29	1,09 ± 0,30
POST MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,75 ± 0,23	0,70 ± 0,22	0,72 ± 0,20
MRTR decremento (%)	-34,6 ± 10,0	-35,9 ± 14,0	-33,3 ± 10,1
<i>100 Hz</i>			
PT decremento (%)	-16,6 ± 7,0	-13,2 ± 5,8	-14,0 ± 5,6
PRE MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	1,90 ± 0,28	1,96 ± 0,24	1,89 ± 0,26
POST MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	1,69 ± 0,32	1,77 ± 0,24	1,66 ± 0,28
MRTD decremento (%)	-11,4 ± 6,2	-10,1 ± 4,3	-12,1 ± 6,4
PRE MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	1,37 ± 0,27	1,44 ± 0,26	1,42 ± 0,27
POST MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	1,35 ± 0,35	1,42 ± 0,31	1,35 ± 0,35
MRTR decremento (%)	-1,4 ± 19,1	-1,4 ± 15,0	-5,2 ± 15,1
<i>Ratio 10/100 Hz</i>			
PRE	0,94 ± 0,17	0,91 ± 0,11	0,92 ± 0,10
POST	0,69 ± 0,16	0,67 ± 0,13	0,69 ± 0,12
decremento (%)	-25,7 ± 13,0	-26,2 ± 9,0	-25,3 ± 6,1

1 Hz, Stimolo singolo; 10 Hz, coppia di stimoli con 100-ms di intervallo; 100 Hz, coppia di stimoli con 10-ms di intervallo; PRE, prima dell'esercizio intermittente; POST, dopo dell'esercizio intermittente; PT, picco del momento di forza; MRTD, Maximal Rate of Torque Development; MRTR, Maximal Rate of Torque Relaxation.

Tutti i parametri misurati POST HIT erano significativamente inferiori rispetto a quelli misurati PRE HIT ($P < 0,001$). Nessuna differenza significativa è stata individuata all'interno dei parametri PRE o dei parametri POST nel corso delle tre sessioni di test ($P = 0,101$). Allo stesso modo, i cali percentuali calcolati per ogni parametro delle proprietà contrattili dei KE erano simili tra le tre sessioni di test ($P = 0,106$). I rapporti 10/100 Hz erano consistenti ($P = 0,698$) nel corso delle tre valutazioni sia in condizioni di riposo (PRE) sia in condizioni di fatica (POST). Conseguentemente, anche i cali percentuali di questo parametro erano simili nei tre test ($\sim 25\%$, $P = 0,957$).

I valori di ripetibilità relativa (ICC) per ognuna delle variabili considerate e i relativi 95% limiti di confidenza sono riportati nella tabella 10. I valori di ICC per i PT PRE e PT POST variavano da moderate ad high con la sola esclusione del PT a 10 Hz calcolato tra le sessioni T2 e T2 (ICC PRE = 0,78, ICC POST = 0,76). Gli ICC relativi ai cali percentuali di PT erano tutti low con la sola esclusione del calo del PT a 1 Hz calcolato tra la sessione T3 e T2 che era moderate (ICC = 0,85). Gli ICC relativi ai valori di MRTD e MRTR sia PRE che POST oscillavano da moderate ad high. Le uniche eccezioni erano gli ICC di MRTD PRE T2 vs T1 e MRTR PRE T3 vs T2 a 1 Hz che erano low. I valori di ICC per i cali percentuali di MRTD e MRTR oscillavano abbastanza da low a moderate (da 0,43 a 0,89). Infine, i valori di ICC per i rapporti 10/100 Hz (PRE, POST e cali percentuali) erano low. In generale, i valori di ICC calcolati comparando T3 vs T2 tendevano ad essere più alti di quelli calcolati comparando T2 vs T1.

I valori di ripetibilità assoluta (typical error, TE) per tutte le variabili considerate sono presentati nella tabella 11. Tutti i TE relativi ai parametri ottenuti utilizzando stimolazioni singole (1 Hz) erano inferiori a 10% con alcuni parametri che mostravano TE inferiori a 5% (cali percentuali di PT e MRTD sia per T2 vs T2 sia per T3 vs T2 e valori PRE e POST di MRTD comparando T3 vs T2). Considerando i parametri ottenuti a 10 Hz, il TE per PT PRE e POST (T2 vs T1), MRTR POST sia T2 vs T1 sia T3 vs T2 erano superiori a 10%. Al contrario, i TE per i cali di PT, MRTD POST, cali di MRTD e MRTR (T3 vs T2) erano inferiori a 5%. Tutti i TE relativi ai parametri ottenuti con stimolazioni a 100 Hz erano inferiori a 10%. I valori di TE relativi a PT PRE T2 vs T1, MRTD POST, MRTR POST e cali percentuali di MRTR erano inferiori a 5%. I valori di TE relativi ai rapporti 10/100 Hz erano inferiori a 10% con la sola esclusione dei valori PRE e POST T2 vs T1. In generale, i valori di TE calcolati comparando la sessione T3 con la sessione T2 erano più bassi rispetto a quelli calcolati usando i valori di T2 e T1.

Tabella 10. Ripetibilità relativa (intra-class correlation coefficients) delle proprietà contrattili degli estensori del ginocchio determinate utilizzando stimolazioni elettriche singole e doppie.

	Test 2 vs Test 1	Test 3 vs Test 2
<i>1 Hz</i>		
PRE PT ($N \cdot m^{-1}$)	0,85 (0,52 – 0,96)	0,87 (0,54 – 0,97)
POST PT ($N \cdot m^{-1}$)	0,90 (0,64 – 0,97)	0,91 (0,66 – 0,98)
PT decremento (%)	0,72 (0,22 – 0,92)	0,85 (0,48 – 0,97)
PRE MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,76 (0,29 – 0,93)	0,88 (0,57 – 0,97)
POST MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,89 (0,61 – 0,97)	0,93 (0,71 – 0,98)
MRTD decremento (%)	0,43 (-0,23 – 0,82)	0,82 (0,39 – 0,96)
PRE MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,84 (0,48 – 0,96)	0,79 (0,33 – 0,95)
POST MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,95 (0,80 – 0,99)	0,87 (0,54 – 0,97)
MRTR decremento (%)	0,83 (0,46 – 0,96)	0,75 (0,22 – 0,94)
<i>10 Hz</i>		
PRE PT ($N \cdot m^{-1}$)	0,78 (0,33 – 0,94)	0,89 (0,60 – 0,97)
POST PT ($N \cdot m^{-1}$)	0,76 (0,29 – 0,93)	0,84 (0,44 – 0,96)
PT decremento (%)	0,64 (0,06 – 0,90)	0,71 (0,14 – 0,93)
PRE MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,80 (0,37 – 0,95)	0,93 (0,71 – 0,98)
POST MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,94 (0,78 – 0,98)	0,97 (0,86 – 0,99)
MRTD decremento (%)	0,46 (-0,19 – 0,83)	0,86 (0,51 – 0,97)
PRE MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,88 (0,60 – 0,97)	0,88 (0,57 – 0,97)
POST MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,91 (0,68 – 0,98)	0,92 (0,70 – 0,98)
MRTR decremento (%)	0,66 (0,09 – 0,90)	0,83 (0,42 – 0,96)
<i>100 Hz</i>		
PRE PT ($N \cdot m^{-1}$)	0,87 (0,57 – 0,97)	0,92 (0,69 – 0,98)
POST PT ($N \cdot m^{-1}$)	0,94 (0,79 – 0,99)	0,97 (0,87 – 0,99)
PT decremento (%)	0,62 (0,03 – 0,89)	0,71 (0,14 – 0,93)
PRE MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,89 (0,62 – 0,97)	0,92 (0,70 – 0,98)
POST MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,87 (0,57 – 0,97)	0,92 (0,70 – 0,98)
MRTD decremento (%)	0,58 (-0,03 – 0,88)	0,48 (-0,22 – 0,85)
PRE MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,98 (0,90 – 0,99)	0,95 (0,81 – 0,99)
POST MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,93 (0,76 – 0,98)	0,96 (0,82 – 0,99)
MRTR decremento (%)	0,84 (0,49 – 0,96)	0,89 (0,60 – 0,97)
<i>Ratio 10/100 Hz</i>		
PRE	0,41 (-0,26 – 0,81)	0,78 (0,31 – 0,95)
POST	0,68 (0,13 – 0,91)	0,74 (0,21 – 0,94)
decremento (%)	0,64 (0,06 – 0,90)	0,62 (-0,02 – 0,90)

1 Hz, stimolo singolo; 10 Hz, stimoli doppi con 100-ms di intervallo; 100 Hz, stimoli doppi con 10-ms di intervallo; PRE, prima; POST, dopo dell'esercizio; PT, picco del momento di forza; MRTD, Maximal Rate of Torque Development; MRTR, Maximal Rate of Torque Relaxation.

Tabella 11. Ripetibilità assoluta (typical error come CV) delle proprietà contrattili degli estensori del ginocchio determinate tramite l'utilizzo di stimolazioni elettriche singole e doppie.

	Test 2 vs Test 1	Test 3 vs Test 2
<i>1 Hz</i>		
PRE PT ($N \cdot m^{-1}$)	5,8 (4,2 – 10,8)	5,1 (3,6 – 9,7)
POST PT ($N \cdot m^{-1}$)	6,6 (4,7 – 12,2)	5,1 (3,5 – 9,7)
PT decremento (%)	4,2 (2,9 – 7,3)	2,9 (2,0 – 5,4)
PRE MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	8,5 (6,1 – 16,1)	4,9 (3,4 – 9,4)
POST MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	6,8 (4,9 – 12,7)	4,6 (3,2 – 8,8)
MRTD decremento (%)	4,6 (3,3 – 8,4)	2,6 (1,9 – 5,0)
PRE MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	7,9 (5,7 – 14,8)	8,2 (5,8 – 16,2)
POST MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	8,3 (6,0 – 15,6)	9,5 (6,7 – 18,9)
MRTR decremento (%)	6,3 (4,4 – 11,0)	6,5 (4,5 – 11,9)
<i>10 Hz</i>		
PRE PT ($N \cdot m^{-1}$)	10,1 (7,3 – 19,4)	5,7 (4,0 -10,9)
POST PT ($N \cdot m^{-1}$)	14,3 (10,5 – 28,6)	9,5 (6,8 – 19,0)
PT decremento (%)	5,5 (3,8 – 9,6)	3,8 (2,6 – 6,9)
PRE MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	9,4 (6,8 – 18,0)	5,3 (3,7 – 10,1)
POST MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	7,4 (5,3 – 13,8)	4,3 (3,0 – 8,2)
MRTD decremento (%)	6,7 (4,7 – 11,8)	3,2 (2,2 – 5,8)
PRE MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	9,4 (6,8 – 18,0)	8,6 (6,1 – 16,9)
POST MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	15,1 (11,2 – 30,4)	10,9 (7,8 – 22,1)
MRTR decremento (%)	7,5 (5,2 – 13,1)	4,9 (3,4 – 8,9)
<i>100 Hz</i>		
PRE PT ($N \cdot m^{-1}$)	5,8 (4,1 – 10,7)	4,2 (2,9 – 8,0)
POST PT ($N \cdot m^{-1}$)	4,7 (3,3 – 8,6)	3,4 (2,4 – 6,4)
PT decremento (%)	4,8 (3,3 – 8,4)	3,0 (2,0 – 5,4)
PRE MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	5,0 (3,6 – 9,2)	4,1 (2,8 – 7,7)
POST MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	7,1 (5,1 – 13,3)	5,1 (3,5 – 9,7)
MRTD decremento (%)	4,7 (3,3 – 8,3)	3,8 (2,6 – 6,9)
PRE MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	3,1 (2,2 – 5,6)	4,8 (3,3 – 9,1)
POST MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	7,7 (5,5 – 14,4)	6,0 (4,2 – 11,7)
MRTR decremento (%)	7,6 (5,3 – 13,4)	4,7 (3,2 – 8,6)
<i>Ratio 10/100 Hz</i>		
PRE	12,5 (9,1 – 24,5)	5,2 (3,7 – 10,0)
POST	13,6 (10,0 – 27,0)	9,6 (6,8 – 19,2)
decremento (%)	6,9 (4,8 – 12,0)	4,7 (3,2 – 8,6)

1 Hz, stimolo singolo; 10 Hz, stimoli doppi con 100-ms di intervallo; 100 Hz, stimoli doppi con 10-ms di intervallo; PRE, prima; POST, dopo dell'esercizio; PT, picco del momento di forza; MRTD, Maximal Rate of Torque Development; MRTR, Maximal Rate of Torque Relaxation.

Discussione

Avere una buona ripetibilità della risposta meccanica di un muscolo (e.g. KE) a seguito di stimolazioni elettriche è un elemento fondamentale per la corretta quantificazione della funzionalità neuromuscolare e della fatica a livello periferico. Lo scopo di questo studio era quello di stabilire la ripetibilità della funzionalità neuromuscolare periferica in condizioni di riposo e in condizioni di fatica indotta da un esercizio di corsa intermittente ad alta intensità. Dai risultati di questo studio è possibile concludere che la quantificazione delle proprietà contrattili del muscolo mostra buoni livelli di ripetibilità sia in condizioni di riposo sia in condizioni di fatica, in particolare a seguito di una sessione di familiarizzazione.

I parametri basali

Per i parametri basali, non è stata individuata alcuna differenza sistematica nel corso delle tre sessioni. I valori di ICC erano da moderate ad high e i valori di TE erano generalmente inferiori a 10% per tutte le tipologie di stimolazioni elettriche utilizzate. Questi risultati sono paragonabili a quelli precedentemente riportati per i parametri che descrivono le proprietà contrattili del muscolo a riposo (Todd *et al.*, 2004; Morton *et al.*, 2005; Place *et al.*, 2007; Blacker *et al.*, 2013). Tuttavia, nel presente studio è stata determinata la ripetibilità della risposta meccanica ottenuta tramite l'utilizzo di diverse stimolazioni elettriche. La miglior ripetibilità assoluta è stata mostrata dalle stimolazioni a 100 Hz (TE da 3,1% a 5,8%), seguita da quelle a 1 Hz (TE da 4,9% a 8,5%) e poi da quelle a bassa frequenza (TE 10 Hz da 5,3% a 10,1%). Questi risultati concordano con quelli recentemente riportati da Blacker *et al.* (2013) che ha riportato una variabilità maggiore nella forza sviluppata a seguito di stimolazioni elettriche singole rispetto a stimoli doppi a 100 Hz. Gli stessi però sono in contrasto con quanto riportato da Place *et al.* (2007), i quali hanno suggerito valori di TE inferiori per il picco di forza ottenuto con stimolazioni singole rispetto a stimolazioni doppie. Pur considerando le differenze sopra menzionate, è possibile concludere che la determinazione delle proprietà contrattili dei KE, in condizioni di riposo ed utilizzando tutte le tre forme di stimolazione elettrica mostra livelli di ripetibilità accettabili.

I parametri sotto fatica

Ad oggi, solo uno studio ha verificato la ripetibilità della risposta meccanica evocata a seguito di un esercizio affaticante (Place *et al.*, 2007). Tuttavia, la prolungata (2 minuti) contrazione isometrica utilizzata per ottenere l'affaticamento non può essere considerata specifica per la maggior parte degli

sport. Questo è un aspetto importante da considerare dato che si ritiene che i meccanismi della fatica siano specifici rispetto all'esercizio affaticante utilizzato (Cairns *et al.*, 2005). Tuttavia, i primi risultati ottenuti da Place *et al.* (2007) suggerivano una buona ripetibilità anche in condizioni di fatica non escludendo l'eventuale possibilità di utilizzo di questa tecnica per la quantificazione della funzionalità periferica anche a seguito di altre tipologie di esercizio affaticante.

Nel corso delle tre sessioni, l'esercizio HIT riduceva le proprietà contrattili dei muscoli KE. Infatti, il PT a 1 Hz diminuiva del 31-35%, a 10 Hz diminuiva del 36-38% e a 100 Hz diminuiva del 13-16%. Il rapporto 10/100 Hz diminuiva significativamente del 25-26%. Tutti questi risultati suggerivano la presenza sia della high-frequency fatigue sia della low-frequency fatigue. Cali significativi sono stati individuati anche per MRTD (29-30%, 29-31% e 10-12% rispettivamente a 1 Hz, 10 Hz e 100 Hz) e per MRTR (29-32%, 33-36% e 1-5% rispettivamente a 1 Hz, 10 Hz e 100 Hz). Tutti questi decrementi confermano la presenza di fatica di tipo periferico a seguito del test HIT, in maniera consistente tra le tre sessioni ($P = 0,106$).

I valori di ICC relativi ai dati POST erano da moderate ad high in maniera simile a quanto riportato da Place *et al.* (2007) nonostante la differenza nel protocollo affaticante utilizzato. Anche i valori di TE mostravano un livello di ripetibilità relativa accettabile ancora una volta in maniera simile a quanto riportato da Place *et al.* (2007).

I valori di PT a 10 Hz POST mostravano livelli di ripetibilità accettabili ma peggiori di quelli a 1 Hz e a 100 Hz (TE = 9,5%, 5,1% e 3,4% rispettivamente a 10 Hz, 1 Hz e 100 Hz). La ripetibilità di POST MRTD a 1 Hz, 10 Hz e 100 Hz era buona e simile a quanto riportato per i valori di PT. Al contrario, la ripetibilità per POST MRTR era peggiore a tutte le frequenze di stimolazione. Questi risultati uniti a quelli riportati da Place *et al.* (2007) suggeriscono che le stimolazioni transcutanee possono essere utilizzate per valutare le risposte meccaniche dei muscoli in condizioni di fatica anche dopo un esercizio di corsa.

Il gold-standard per la determinazione della funzionalità neuromuscolare prevede l'utilizzo di treni d'impulsi che inducono delle contrazioni di tipo tetanico (Edwards *et al.*, 1977). È stato suggerito che è possibile utilizzare il rapporto dei PT sviluppati tramite l'utilizzo di treni d'impulsi a bassa e ad alta frequenza (e.g. 10/100 Hz o 20/50 Hz) per la quantificazione della low-frequency fatigue. Inoltre è stato dimostrato che questo parametro derivato mostra buoni livelli di ripetibilità in condizioni basali (Blacker *et al.*, 2013). Recenti studi hanno suggerito che è possibile utilizzare coppie di stimoli come

valido surrogato dei treni d'impulsi (Martin *et al.*, 2004; Verges *et al.*, 2009). Infatti, l'utilizzo del rapporto PT ottenuto grazie a stimolazioni doppie a 10 Hz rispetto al PT ottenuto con stimolazioni doppie a 100 Hz, consente la quantificazione della low-frequency fatigue (Amann *et al.*, 2006; Verges *et al.*, 2009). Tuttavia, la ripetibilità di questo particolare parametro derivato non è ancora stata definita. Nel presente studio, la ripetibilità assoluta tra T3 e T2 può essere considerata accettabile (TE < 10%) anche se i bassi livelli di ripetibilità relativa suggeriscono cautela nell'interpretazione di questo parametro. Tuttavia, i valori di 10/100 Hz POST raggiunti dai soggetti di questo studio sono risultati essere abbastanza omogenei (CV = 17%). Questo aspetto potrebbe aver negativamente influenzato la determinazione della ripetibilità relativa di questo parametro. La ripetibilità di questo rapporto andrà ulteriormente investigata nel corso di studi futuri in cui saranno presenti valori di rapporto 10/100 Hz sotto fatica maggiormente eterogenei. Le differenze nei risultati di questo studio e di quanto precedentemente riportato sulla ripetibilità dei rapporti potrebbe essere legata anche ad aspetti metodologici. In altre parole, l'utilizzo di treni d'impulsi che inducono contrazioni di tipo tetanico potrebbero portare a calcoli dei rapporti low vs high-frequency più affidabili rispetto all'utilizzo delle coppie di stimoli elettrici.

I cali percentuali

I ricercatori utilizzano comunemente i cali percentuali come indicatore di fatica muscolare (Verges *et al.*, 2009). Tuttavia, la ripetibilità di questi parametri non è mai stata stabilita. In questo studio, la ripetibilità assoluta dei cali percentuali di PT dei rapporti 10/100 Hz era molto buona (TE < 5%). Anche, la ripetibilità assoluta dei cali percentuali di MRTD e MRTR era buona. Al contrario la ripetibilità relativa (ICC) era da moderata a scarsa. Questi risultati suggeriscono che occorre cautela nell'interpretazione dei cali percentuali come indicatore di fatica e il semplice utilizzo dei valori registrati dopo lo sforzo potrebbe essere una strategia alternativa ugualmente affidabile. Tuttavia, allo stesso modo di quanto riportato precedentemente la relativa omogeneità dei cali percentuali potrebbe aver influenzato negativamente la ripetibilità di questi parametri. Ulteriori investigazioni in futuro sarebbero necessarie.

L'effetto della familiarizzazione

Un adeguata familiarizzazione ai protocolli è considerato un passaggio fondamentale per limitare qualsiasi effetto "apprendimento" e raccogliere dati in maniera accurata (Morton *et al.*, 2005). Tuttavia, il protocollo scelto per questo studio non prevedeva alcuna familiarizzazione prima del primo

test. Questa scelta consapevole era utile per determinare la ripetibilità con o senza l'esecuzione di una sessione di familiarizzazione. E' quindi abbastanza normale osservare che in generale, i valori di ICC e TE tendono ad essere migliori quando si calcola la ripetibilità utilizzando i dati dei T3 e T2 rispetto a quando si usano i dati raccolti nel corso delle sessioni T2 e T1. Questo fenomeno è abbastanza evidente sia sui parametri basali (non influenzati dall'esecuzione dell'HIT), sia sui parametri misurati in condizioni di fatica.

Il maggior incremento dei valori di ICC è stato osservato per i cali percentuali, ad eccezione dei cali di MRTR a 1 Hz e MRTD a 100 Hz. E' molto probabile che questo fenomeno sia dovuto al fatto che, i cali percentuali sono calcolati basandosi sia sui dati PRE che su quelli POST e quindi tiene conto della familiarizzazione dei soggetti anche alla corsa intermittente. In accordo con Morton *et al.* (2005), la singola sessione di familiarizzazione potrebbe essere sufficiente al fine di ottenere valutazioni ripetibili della funzionalità neuromuscolare a livello periferico sia in condizioni basali sia in condizioni di fatica.

In conclusione, l'utilizzo delle stimolazioni elettriche per la quantificazione della fatica periferica indotta da un esercizio di corsa intermittente mostra un livello di ripetibilità accettabile. I risultati di questo studio uniti a quanto riportato precedentemente (Place *et al.*, 2007), supportano l'utilizzo di questa tecnica per la quantificazione delle proprietà contrattili del muscolo a riposo e in condizioni di fatica anche in condizioni più difficilmente standardizzabili come quelle del campo. Un minimo di una seduta di familiarizzazione sembra essere utile per migliorare ulteriormente la ripetibilità.

Questa tipologia di valutazione potrebbe essere estesa anche agli atleti che praticano sport intermittenti quali i calciatori. Oltre alla ripetibilità, studi futuri dovranno stabilire la sensibilità e la validità del monitoraggio della fatica periferica per l'ottimizzazione della performance degli atleti. Ad esempio, sarà necessario effettuare un monitoraggio prolungato (e.g. una stagione agonistica) di questo parametro al fine di verificare l'influenza dell'allenamento svolto dal calciatore nel corso dell'anno al fine di limitare la fatica periferica indotta da un esercizio di corsa intermittente ad alta intensità.

Capitolo 6

VARIAZIONI STAGIONALI DELLA FATICA NEUROMUSCOLARE PERIFERICA INDOTTA DA UN ESERCIZIO DI CORSA INTERMITTENTE AD ALTA INTENSITA'

Introduzione

Il calcio è uno sport di squadra che richiede ai giocatori la capacità di sostenere sforzi intermittenti ad alta intensità (Mohr *et al.*, 2003). Nel corso di una partita, i calciatori cambiano attività mediamente ogni 5 s ed effettuano circa 1300 diversi tipi di attività. Di queste circa 200 sono fatte ad alta intensità (Mohr *et al.*, 2003). Oltre alle fasi di corsa, i giocatori devono effettuare altre tipologie di attività che richiedono lo sviluppo di buoni livelli di forza quali: cambi di direzione, dribbling, contrasti o salti. Nel corso di una partita e in particolare nel corso delle fasi svolte ad alta intensità, il meccanismo aerobico e quello anaerobico dei giocatori sono significativamente attivati (Bangsbo, 1994a).

La fatica è un fenomeno multifattoriale che può essere definito come: “un acuto deterioramento della performance che include sia un aumento della percezione dello sforzo necessaria per produrre una determinata forza o potenza sia eventualmente un’incapacità di produrre la massima forza o potenza” (Gandevia, 2001). Il miglioramento delle tecniche di elettrostimolazione consentono oggi la quantificazione della fatica periferica indipendentemente da quella centrale. La fatica periferica può essere divisa in high- e low-frequency (Jones, 1996). La high-frequency fatigue è definita come la perdita di forza utilizzando alte frequenze di stimolazione ed è una tipologia di fatica che si recupera abbastanza velocemente. Si ritiene che la high-frequency fatigue sia causata da una alterazione della propagazione del potenziale d’azione sul sarcolemma o sui tubuli t (Jones, 1996). La low-frequency fatigue (anche chiamata long-lasting fatigue) è caratterizzata da un recupero molto lento (ore o addirittura giorni) (Jones, 1996) ed è associata ad un fallimento del processo eccitamento-contrazione (Perrey *et al.*, 2010). La fatica è specifica rispetto alla tipologia, alla durata e all’intensità dell’esercizio che si effettua (Millet and Lepers, 2004), tuttavia è stato dimostrato che la fatica di tipo centrale sembra essere più importante quando gli esercizi sono molto prolungati nel tempo. Al contrario, la fatica di tipo periferico sembra essere maggiormente importante con gli esercizi sono relativamente brevi ma intensi (Taylor and Gandevia, 2008).

Nel calcio è possibile distinguere almeno tre tipologie di fatiche: quella di tipo transitorio che si genera a seguito delle fasi più impegnative del match, quella nella fase finale della partita e quella di tipo permanente ovvero quella che persiste nelle ore o nei giorni successivi al termine dell’incontro (Mohr *et al.*, 2005). La fatica di tipo transitorio è quella che si genera a seguito delle fasi più intense della partita. Utilizzando i dati di time-motion-analysis è stato evidenziato che a seguito dei 5 minuti di

partita in cui si registrata la maggior quantità di lavoro ad alta intensità seguono sempre 5 minuti in cui il lavoro ad alta intensità è inferiore al valore medio del match (Mohr *et al.*, 2003; Bradley *et al.*, 2009). Se a questo si aggiunge che la capacità di effettuare sprint ripetuti risulta peggiorata dopo aver svolto un breve periodo di lavoro ad alta intensità (Krustrup *et al.*, 2006b) si può arrivare a concludere che i calciatori attraversano dei momenti di fatica transitoria durante la partita. Quali siano le cause di questa riduzione di performance non è ancora del tutto chiaro.

In questo contesto, nessuno studio si è ancora occupato di investigare la fatica periferica di tipo low-frequency e quella di tipo high-frequency indotta da un esercizio di corsa intermittente ad alta intensità in un gruppo di calciatori professionisti. Per questo motivo, lo scopo di questo studio era quello di monitorare le variazioni stagionali dell'efficienza (in condizioni di riposo) e della fatica (a seguito di un esercizio di corsa intermittente) neuromuscolare periferica in un gruppo di calciatori professionisti adulti e in uno di professionisti giovani.

Materiali e Metodi

Lo studio è stato disegnato per monitorare le variazioni stagionali della funzionalità neuromuscolare degli estensori del ginocchio (KE) sia in condizioni basali sia di fatica in due gruppi di calciatori professionisti. Per questo, i calciatori sono stati sottoposti a quattro sessioni di valutazioni (Test 1, Test 2, Test 3 e Test 4) effettuate rispettivamente, all'inizio del periodo preparatorio (luglio), alla fine del periodo preparatorio (agosto), a metà del periodo competitivo (novembre) e fine del periodo competitivo (aprile). Le sessioni di test sono state effettuate tutte alla stessa ora della giornata. Durante ognuna delle sessioni, le proprietà contrattili dei KE sono state determinate utilizzando delle stimolazioni elettriche prima (PRE) e dopo (POST) un esercizio di corsa intermittente ad alta intensità. Le misure POST sono state effettuate 90 secondi dopo la fine dell'esercizio intermittente.

Soggetti

Lo studio è stato condotto su 11 calciatori professionisti adulti (età: 23 ± 3 anni, altezza 181 ± 4 cm, peso 78 ± 6 kg) e 12 calciatori professionisti giovani (età: 17 ± 1 anni, altezza 181 ± 4 cm, peso 71 ± 5 kg). Prima di iniziare lo studio i soggetti hanno firmato il consenso informato di partecipazione e la ricerca è stata approvata dall'Institutional Review Board di Mapei Sport. I calciatori si allenavano regolarmente 6 volte alla settimana (oltre ad una partita ufficiale).

Misura della funzionalità contrattile del muscolo

Le proprietà contrattili del muscolo sono state misurate sui KE destri con i soggetti seduti su una leg extension. Il ginocchio e l'anca erano fissate a 90° (0° = estensione completa del ginocchio), e alcune cinture di Velcro erano posizionate sulla gamba e sull'anca per minimizzare i movimenti. I soggetti dovevano impugnare la seduta nel corso delle contrazioni per stabilizzare ulteriormente la posizione. La risposta meccanica del muscolo è stata registrata tramite l'utilizzo di una cella di carico (AIP, Varese, Italia) connessa ad un sistema di acquisizione di segnali (BIOPAC MP100, BIOPAC System Inc, Santa Barbara, CA) con una frequenza di campionamento di 500 Hz. La cella di carico era stata calibrata utilizzando dei pesi di riferimento certificati. Gli stimoli singoli (1 Hz) e quelli doppi (10 Hz, 100-ms di intervallo e 100 Hz, 10-ms di intervallo) venivano prodotti tramite l'utilizzo di un impulso ad onda quadra (200 μ s) inviato da uno stimolatore di corrente continua (Digitimer DS7AH, Hertfordshire, UK) ad alto voltaggio (massimo voltaggio = 400 V). Il nervo femorale veniva stimolato utilizzando due elettrodi adesivi (Compex, Ecublens, Svizzera). Il catodo (5 x 5 cm) era posizionato nel triangolo femorale mentre l'anodo (10 x 5 cm) sulla linea del gluteo. Il posizionamento degli elettrodi veniva effettuato dallo stesso operatore in tutte le sessioni di test. A riposo, la loro posizione veniva segnata sulla pelle prima di rimuoverli. A seguito del test intermittente, la pelle veniva asciugata e gli elettrodi venivano riposizionati sulla pelle nello stesso punto.

La corrente necessaria per stimolare al massimo i KE era determinata tramite graduali incrementi di amperaggio (10 mA) fino a quando si verificava un plateau nel picco del momento di forza generato dalla twitch. Successivamente, l'intensità veniva ulteriormente aumentata del 20% e mantenuta costante nel corso dell'intera sessione di valutazione (media intensità = 188 ± 56 mA, range = 86 – 312 mA). Prima dell'inizio di ogni sessione l'intensità ottimale veniva ri-definita. Per ognuna delle tipologie di stimolazioni elettriche venivano calcolati i seguenti parametri: picco del momento di forza (PT), Maximal Rate of Torque Development (MRTD) (i.e. valore più elevato della derivata prima del segnale di momento di forza espresso), Maximal Rate of Torque Relaxation (MRTR), (i.e. valore più basso della derivata prima del segnale di momento di forza espresso). Veniva anche calcolato il rapporto tra i PT ottenuto a 10 Hz rispetto a quello ottenuto a 100 Hz (10/100 Hz) come indicatore di low-frequency fatigue.

L'esercizio di corsa intermittente ad alta intensità

I soggetti effettuavano un riscaldamento costituito da 5 minuti di corsa a bassa intensità, seguiti da 3 accelerazioni al 70% del proprio massimale su 50 m con un minuto di recupero tra ogni

accelerazione. Il test di corsa intermittente ad alta intensità (High-intensity Intermittent Test, HIT) richiedeva ai soggetti di effettuare delle corse a navetta su un percorso di 25 + 25 m con un cambio di direzione di 180° da effettuarsi in 10 secondi seguiti da 20 secondi di recupero passivo. I soggetti dovevano seguire una lepre acustica che gli imponeva una velocità media di corsa di 18 km·h⁻¹. Le corse da effettuarsi erano 10 e la durata totale del test era di 5 minuti.

Risposte fisiologiche e percezione dello sforzo

Dopo il test HIT, venivano raccolti 100 µL di sangue capillare per l'analisi della concentrazione di idrogenioni (H⁺) tramite un emogas analizzatore (GEM Premier 3000, Instrumentation Laboratory, Milano, Italia). Un campione di sangue capillare (5 µL) veniva anche raccolto per determinare la concentrazione di lattato (La⁻) tramite specifico analizzatore (LactatePro, Arkray, Kyoto, Giappone). Dopo il test HIT, veniva anche raccolta la percezione dello sforzo generale (RPE) relativa ai 5 minuti di esercizio utilizzando la scala di Borg CR10. Durante le prove veniva registrata anche la frequenza cardiaca (HR) tramite specifici strumenti (Polar Vantage NV, Kempele, Finlandia).

Analisi statistica

I valori vengono presentati come media ± SD. L'ANOVA per misure ripetute è stata utilizzata per individuare le differenze stagionali nelle quattro sessioni di test. Come post-hoc è stato utilizzato il test Tukey's HSD. Come misura di effect size è stato calcolato l'eta squared parziale (η^2) e i valori di 0,01, 0,06 e sopra 0,15 sono stati considerati come small, medium e large (Cohen, 1988). Il livello di significatività è stato fissato a P < 0,05 e le analisi sono state effettuate utilizzando il software SPSS 13.0 statistical software (SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

Risultati

Le medie ± SD dell'accumulo La⁻ e H⁺, della HR e della RPE nel corso delle varie sessioni di test e relative ai due gruppi di calciatori sono presentate nella tabella 12. In entrambi i gruppi di calciatori sono state individuate variazioni stagionali significative (P > 0,045) per tutte le variabili considerate (La⁻, H⁺, HR e RPE). I parametri misurati nel periodo competitivo (Test 2, Test 3 e Test 4) erano significativamente inferiori rispetto a quelli misurati all'inizio della preparazione (Test 1) (P < 0,05). Alcuni parametri misurati alla fine (Test 4) erano significativamente inferiori rispetto a quelli misurati all'inizio (Test 2) del periodo competitivo (accumulo di La⁻ nel gruppo di adulti) o a metà (Test 3) del periodo competitivo stesso (accumulo di La⁻ e H⁺ nel gruppo di giovani).

Tabella 12. Accumulo di lattato ed idrogenioni, risposta cardiaca e percettiva a seguito di un esercizio di corsa intermittente standardizzata nel corso dei quattro test della stagione in un gruppo di professionisti adulti e professionisti giovani.

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	ANOVA	$p\eta^2$
<i>Adulti Professionisti</i>						
Lattato (mmol·l ⁻¹)	9,5 ± 2,7	7,8 ± 3,2 *	6,5 ± 2,7 *	5,8 ± 2,6 *†	<0,001	0,66
Idrogenioni (mmol·l ⁻¹)	56,6 ± 10,2	51,8 ± 10,9 *	50,6 ± 9,0 *	50,7 ± 7,1 *	0,044	0,32
Frequenza cardiaca (bpm)	171 ± 8	164 ± 12 *	156 ± 12 *	164 ± 9 *	0,016	0,38
RPE (au)	3,9 ± 1,0	3,3 ± 0,4 *	3,1 ± 0,3 *	2,9 ± 0,2 *	<0,001	0,51
<i>Giovani Professionisti</i>						
Lattato (mmol·l ⁻¹)	10,3 ± 2,3	6,7 ± 2,1 *	7,6 ± 2,4 *	6,2 ± 1,8 *‡	<0,001	0,71
Idrogenioni (mmol·l ⁻¹)	55,6 ± 6,6	49,3 ± 5,8 *	51,8 ± 7,0 *	47,9 ± 5,1 *‡	<0,001	0,54
Frequenza cardiaca (bpm)	181 ± 10	167 ± 13 *	168 ± 8 *	169 ± 10 *	<0,001	0,69
RPE (au)	5,0 ± 0,9	4,2 ± 0,7 *	4,7 ± 1,1	4,3 ± 1,2 *	0,014	0,27

*, p<0,05; significativamente diverso da Test 1; †, p<0,05; significativamente diverso da Test 2; ‡, p<0,05; significativamente diverso da Test 3.

La media ± SD delle proprietà contrattili dei KE, misurate prima e dopo il test HIT tramite l'utilizzo di stimolazioni elettriche a 1 Hz, nel corso delle varie sessioni di test e relative ai due gruppi di calciatori sono presentate nella tabella 13 mentre i cali percentuali dei PT a 1 Hz sono rappresentate nella figura 11. Tutti i valori basali (PRE) sono risultati stabili ($P > 0,211$, $p\eta^2 < 0,15$) nel corso della stagione ad esclusione del MRTD PRE misurato nel Test 3 e Test 4 che erano significativamente inferiori rispetto allo stesso parametro misurato nel Test 1 e Test 2 per gli adulti ($P = 0,008$, $p\eta^2 = 0,43$) e il MRTD PRE del test 1 che era maggiore a quello misurato in tutte le altre sessioni nei giovani ($P =$

0,023, $p\eta^2 = 0,25$). Tutti i valori POST sono risultati stabili nel corso della stagione in entrambi i gruppi di giocatori ($P > 0,079$, $p\eta^2 < 0,28$). I cali percentuali di PT degli adulti erano più bassi nel corso dei Test 3 e Test 4 rispetto a quanto riscontrato nel Test 1 e Test 2 ($P = 0,018$, $p\eta^2 = 0,38$). Negli adulti, anche il calo percentuale di MRTD era inferiore nei Test 3 e Test 4 rispetto al Test 2 ($P = 0,032$, $p\eta^2 = 0,34$). Anche nei giovani, i cali percentuali di PT erano più bassi nel corso dei Test 3 e Test 4 rispetto al Test 1 ($P = 0,016$, $p\eta^2 = 0,27$).

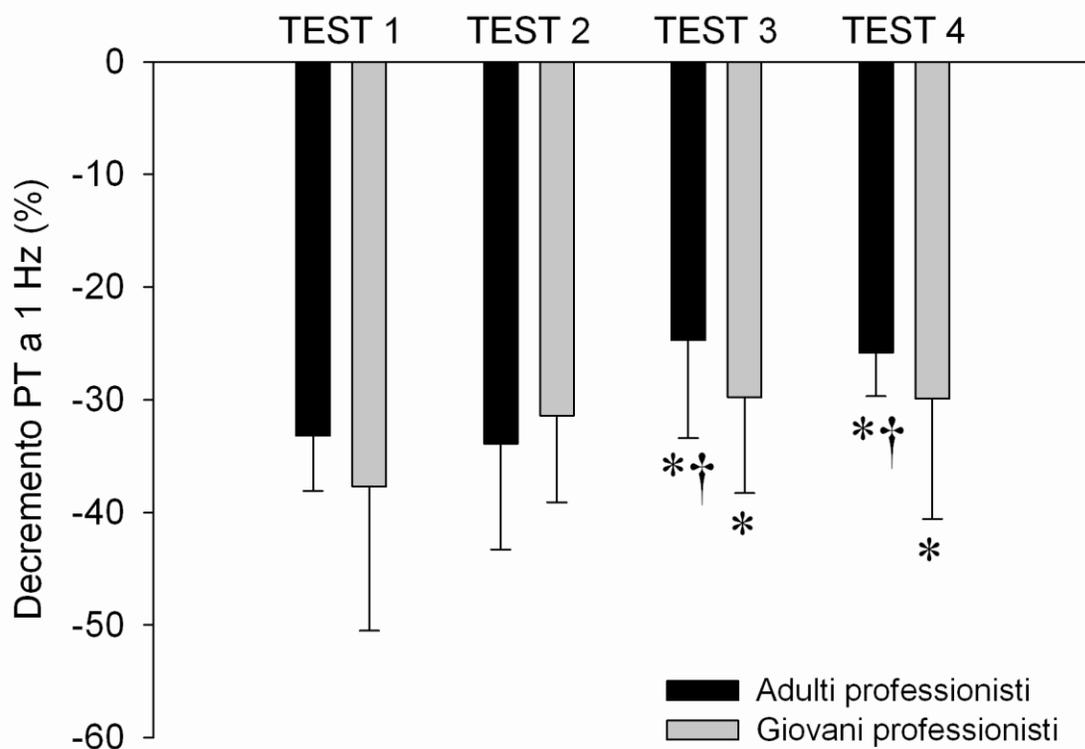


Figura 11. Decremento percentuale del picco del momento di forza (PT) ottenuto tramite l'uso di stimolazioni elettriche a 1 Hz a seguito del test HIT, nel corso delle quattro sessioni di test in un gruppo di calciatori professionisti adulti (barre nere) e un gruppo di calciatori professionisti giovani (barre grigie). *, $P < 0,05$, significativamente diverso da test 1; †, $P < 0,05$, significativamente diverso da test 2.

Tabella 13. Proprietà contrattili degli estensori del ginocchio misurate utilizzando degli stimoli elettrici singoli nel corso delle quattro valutazioni effettuate in stagione in un gruppo di calciatori professionisti adulti e un gruppo di calciatori professionisti giovani.

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	ANOVA	$p\eta^2$
<i>Adulti Professionisti</i>						
PRE PT ($N \cdot m^{-1}$)	73,4 ± 9,9	69,3 ± 8,1	67,9 ± 9,9	69,6 ± 8,3	0,375	0,14
POST PT ($N \cdot m^{-1}$)	48,9 ± 7,2	46,0 ± 9,5	50,8 ± 7,1	51,5 ± 5,2	0,080	0,27
PT decremento (%)	-33,2 ± 4,9	-33,9 ± 9,4	-24,7 ± 8,7 *†	-25,8 ± 3,9 *†	0,018	0,38
PRE MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	1,36 ± 0,18	1,33 ± 0,18	1,16 ± 0,13 *†	1,24 ± 0,14 *†	0,008	0,43
POST MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	1,03 ± 0,16	0,93 ± 0,20	0,95 ± 0,14	0,98 ± 0,12	0,206	0,19
MRTD decremento (%)	-24,4 ± 6,9	-30,3 ± 9,0	-18,2 ± 9,4 †	-20,9 ± 6,9 †	0,032	0,34
PRE MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,84 ± 0,13	0,83 ± 0,08	0,80 ± 0,10	0,78 ± 0,09	0,615	0,08
POST MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,57 ± 0,09	0,48 ± 0,08	0,54 ± 0,06	0,54 ± 0,06	0,082	0,27
MRTR decremento (%)	-31,1 ± 9,9	-35,4 ± 4,3	-31,3 ± 6,3	-29,7 ± 7,5	0,447	0,12
<i>Giovani Professionisti</i>						
PRE PT ($N \cdot m^{-1}$)	67,9 ± 11,6	64,0 ± 11,3	65,1 ± 7,4	64,2 ± 11,5	0,212	0,13
POST PT ($N \cdot m^{-1}$)	42,7 ± 13,1	44,3 ± 11,1	46,0 ± 8,9	45,6 ± 13,1	0,338	0,10
PT decremento (%)	-37,7 ± 12,8	-31,4 ± 7,7	-29,8 ± 8,5 *	-29,9 ± 10,7 *	0,016	0,27
PRE MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	1,33 ± 0,21	1,20 ± 0,13 *	1,22 ± 0,14 *	1,22 ± 0,14 *	0,023	0,25
POST MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,90 ± 0,25	0,90 ± 0,19	0,90 ± 0,16	0,88 ± 0,25	0,961	0,01
MRTD decremento (%)	-32,3 ± 14,9	-25,6 ± 10,8	-26,4 ± 10,3	-29,0 ± 14,4	0,223	0,12
PRE MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,83 ± 0,20	0,77 ± 0,19	0,75 ± 0,11	0,76 ± 0,18	0,230	0,12
POST MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,53 ± 0,19	0,54 ± 0,18	0,52 ± 0,11	0,53 ± 0,19	0,956	0,01
MRTR decremento (%)	-35,3 ± 17,0	-30,5 ± 13,4	-30,1 ± 9,3	-30,8 ± 17,2	0,695	0,04

PRE, prima della corsa intermittente ad alta intensità; POST, dopo della corsa intermittente ad alta intensità; PT, picco del momento di forza; MRTD, Maximal Rate of Torque Development; MRTR, Maximal Rate of Torque Relaxation. *, $p < 0,05$; significativamente diverso da Test 1; †, $p < 0,05$; significativamente diverso da Test 2.

La media \pm SD delle proprietà contrattili dei KE, misurate prima e dopo il test HIT tramite l'utilizzo di stimolazioni a 10 Hz, nel corso delle varie sessioni di test e relative ai due gruppi di calciatori sono presentate nella tabella 14 mentre i cali percentuali dei PT a 10 Hz sono rappresentate nella figura 12. I valori basali (PRE) di PT e MRTR a 10 Hz erano stabili stabili ($P > 0,097$, $p\eta^2 < 0,18$) nel corso della stagione in entrambi i gruppi di calciatori. I valori di MRTD PRE a 10 Hz negli adulti erano significativamente minori nei Test 3 e Test 4 rispetto allo stesso parametro misurato nei Test 1 e Test 2 ($P = 0,010$, $p\eta^2 = 0,41$). In maniera simile, anche nel gruppo dei giovani i valori di MRTD PRE a 10 Hz erano minori nel corso dei Test 2, Test 3 e Test 4 rispetto a quanto verificato nel Test 1 ($P = 0,021$, $p\eta^2 = 0,25$). Negli adulti, tutti i parametri misurati POST HIT erano stabili nel corso della stagione ($P > 0,065$, $p\eta^2 < 0,29$). Nei giovani, i parametri MRTD e MRTR misurati POST HIT erano stabili nei 4 test ($P > 0,388$, $p\eta^2 < 0,10$), mentre il PT POST a 10 Hz era significativamente maggiore nei Test 3 e Test 4 rispetto al Test 1 ($P = 0,038$, $p\eta^2 = 0,22$). Per quanto riguarda i decrementi percentuali POST HIT, nei calciatori adulti si verificava una riduzione del calo del PT a 10 Hz nel Test 3 e nel Test 4 rispetto ai Test 1 e Test 2 ($P < 0,001$, $p\eta^2 = 0,59$). Nello stesso gruppo, anche i decrementi del MRTD a 10 Hz erano minori nel Test 4 rispetto a quanto avveniva nel Test 1 e Test 2 ($P = 0,010$, $p\eta^2 = 0,41$), mentre i decrementi di MRTR a 10 Hz erano stabili ($P = 0,153$, $p\eta^2 = 0,22$). Nel gruppo dei giovani, era presente una riduzione del calo percentuale del PT a 10 Hz nel Test 2, nel Test 3 e nel Test 4 rispetto al Test 1 ($P < 0,001$, $p\eta^2 = 0,44$). Nello stesso gruppo i decrementi di MRTD a 10 Hz erano stabili ($P = 0,325$, $p\eta^2 = 0,10$), mentre i decrementi di MRTR a 10 Hz erano minori nel Test 2, nel Test 3 e nel Test 4 rispetto al Test 1 ($P < 0,001$, $p\eta^2 = 0,38$).

Tabella 14. Proprietà contrattili degli estensori del ginocchio misurate utilizzando coppie di stimoli elettrici a 10 Hz nel corso delle quattro valutazioni effettuate in stagione in un gruppo di calciatori professionisti adulti e un gruppo di calciatori professionisti giovani.

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	ANOVA	η^2
<i>Adulti Professionisti</i>						
PRE PT ($N \cdot m^{-1}$)	123,9 ± 17,7	116,6 ± 17,9	116,8 ± 15,2	111,8 ± 26,0	0,111	0,24
POST PT ($N \cdot m^{-1}$)	76,6 ± 14,0	77,3 ± 14,2	85,8 ± 13,1	83,4 ± 19,5	0,066	0,28
PT decremento (%)	-38,3 ± 6,1	-33,6 ± 7,6	-26,5 ± 6,2 *†	-25,3 ± 5,4 *†	<0,001	0,59
PRE MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	1,35 ± 0,20	1,31 ± 0,22	1,14 ± 0,13 *†	1,14 ± 0,25 *†	0,010	0,41
POST MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	1,04 ± 0,17	1,00 ± 0,17	0,96 ± 0,15	1,04 ± 0,12	0,213	0,19
MRTD decremento (%)	-22,5 ± 7,7	-23,8 ± 4,8	-15,8 ± 9,9	-6,3 ± 16,5 *†	0,010	0,41
PRE MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	1,44 ± 0,19	1,41 ± 0,30	1,40 ± 0,22	1,29 ± 0,35	0,415	0,12
POST MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,99 ± 0,19	0,97 ± 0,19	1,04 ± 0,14	1,02 ± 0,24	0,806	0,05
MRTR decremento (%)	-30,0 ± 16,9	-29,5 ± 13,6	-24,8 ± 11,8	-19,7 ± 6,3	0,153	0,22
<i>Giovani Professionisti</i>						
PRE PT ($N \cdot m^{-1}$)	110,8 ± 24,0	103,8 ± 21,9	104,5 ± 16,6	102,8 ± 22,3	0,230	0,12
POST PT ($N \cdot m^{-1}$)	62,4 ± 24,6	68,3 ± 19,9	71,9 ± 20,0 *	72,3 ± 22,2 *	0,038	0,22
PT decremento (%)	-45,3 ± 13,6	-34,9 ± 7,5 *	-31,7 ± 14,1 *	-30,6 ± 9,0 *	<0,001	0,44
PRE MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	1,30 ± 0,22	1,16 ± 0,14 *	1,18 ± 0,14 *	1,20 ± 0,16 *	0,021	0,25
POST MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,93 ± 0,22	0,88 ± 0,21	0,91 ± 0,18	0,90 ± 0,25	0,610	0,05
MRTD decremento (%)	-28,4 ± 10,5	-24,5 ± 11,8	-23,2 ± 11,5	-25,8 ± 13,8	0,325	0,10
PRE MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	1,41 ± 0,35	1,30 ± 0,32	1,24 ± 0,22	1,25 ± 0,30	0,098	0,17
POST MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	0,83 ± 0,37	0,91 ± 0,35	0,93 ± 0,27	0,91 ± 0,32	0,389	0,09
MRTR decremento (%)	-42,5 ± 16,9	-31,6 ± 12,0 *	-25,2 ± 18,9 *	-28,0 ± 12,7 *	<0,001	0,38

PRE, prima; POST, dopo della corsa intermittente; PT, picco del momento di forza; MRTD, Maximal Rate of Torque Development; MRTR, Maximal Rate of Torque Relaxation. *, p<0,05; significativamente diverso da Test 1; †, p<0,05; significativamente diverso da Test 2.

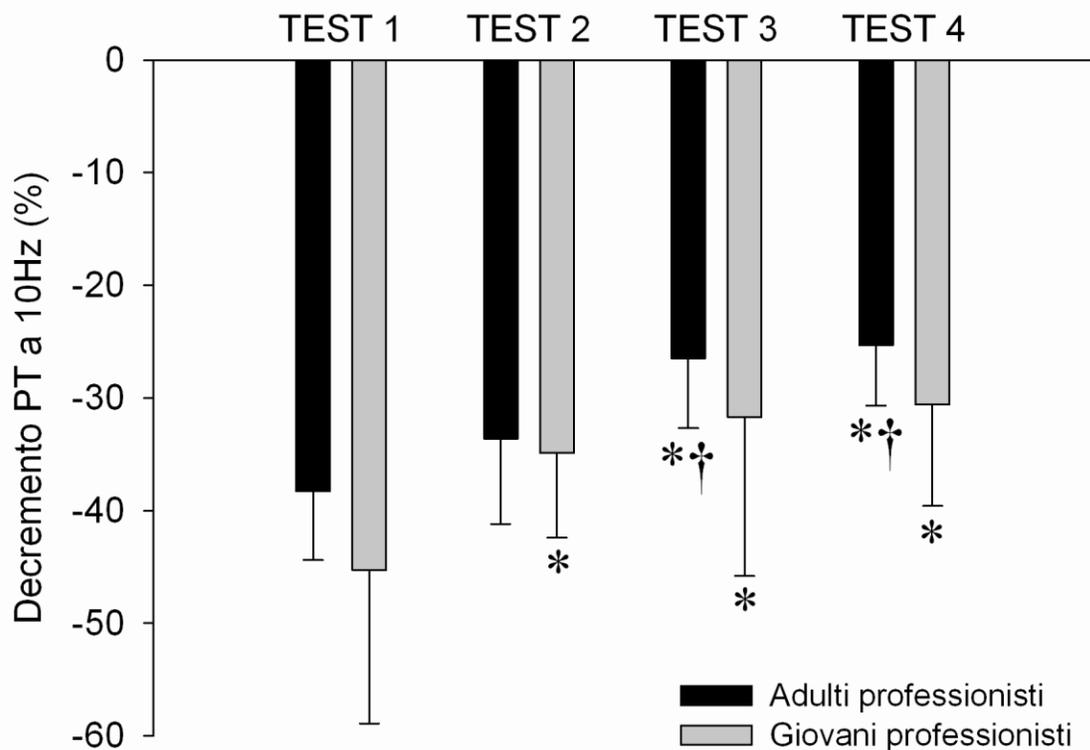


Figura 12. Decremento percentuale del picco del momento di forza (PT) ottenuto tramite l'utilizzo di stimolazioni elettriche a 10 Hz a seguito del test HIT, nel corso delle quattro sessioni di test in un gruppo di calciatori professionisti adulti (barre nere) e un gruppo di calciatori professionisti giovani (barre grigie). *, $P < 0,05$, significativamente diverso da test 1; †, $P < 0,05$, significativamente diverso da test 2.

La media \pm SD delle proprietà contrattili dei KE, misurate prima e dopo il test HIT tramite l'utilizzo di stimolazioni a 100 Hz, nel corso delle varie sessioni di test e relative ai due gruppi di calciatori sono presentate nella tabella 15 mentre i cali percentuali dei PT a 100 Hz sono rappresentate nella figura 13. Tutti i parametri basali (PRE) determinati tramite l'utilizzo di stimolazioni a 100 Hz erano stabili ($P > 0,217$, $p\eta^2 < 0,20$) nel corso della stagione in entrambi i gruppi di calciatori. Per quanto riguarda i valori POST HIT del gruppo degli adulti, i valori di MRTD POST erano stabili nel corso dell'anno ($P = 0,255$, $p\eta^2 = 0,17$), mentre i valori di PT POST a 100 Hz erano maggiori nel corso del Test 4 e del Test 3 rispetto al Test 1 e maggiori nel Test 4 rispetto al Test 2 ($P = 0,006$, $p\eta^2 = 0,44$).

Allo stesso modo, i valori di MRTR POST erano maggiori nel Test 3 e nel Test 4 rispetto al Test 1 ed erano maggiori nel Test 3 rispetto al Test 2 ($P = 0,009$, $p\eta^2 = 0,42$). Nel gruppo dei giovani, i valori del PT POST a 100 Hz erano stabili nel corso della stagione ($P = 0,254$, $p\eta^2 = 0,11$), mentre i valori di MRTD e MRTR POST a 100 Hz cambiavano significativamente nel corso dell'anno ($P = 0,035$, $p\eta^2 = 0,23$ e $P = 0,009$, $p\eta^2 = 0,23$, rispettivamente). I decrementi percentuali a seguito del test HIT di PT e MRTR nel gruppo di adulti cambiavano significativamente nel corso dell'anno ($P = 0,010$, $p\eta^2 = 0,41$ e $P = 0,007$, $p\eta^2 = 0,43$, rispettivamente). Sia il decremento di PT sia il decremento di MRTR, era minore nel corso dei Test 3 e Test 4 rispetto al Test 1 ed era minore nel Test 4 rispetto al Test 2. Nel gruppo dei giovani, solo il decremento di MRTR a 100 Hz era minore nel Test 3 rispetto al Test 1 ($P < 0,001$, $p\eta^2 = 0,46$). I cambiamenti nei decrementi di PT e MRTD a 100 Hz erano stabili nel corso dell'anno ($P = 0,178$, $p\eta^2 = 0,14$ e $P = 0,197$, $p\eta^2 = 0,13$, rispettivamente).

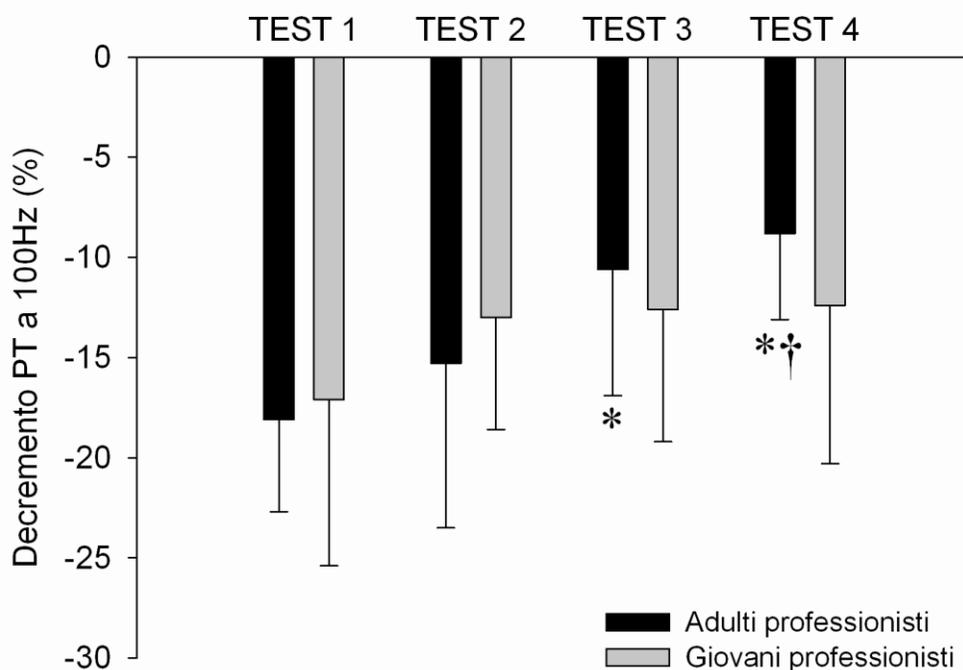


Figura 13. Decremento percentuale del picco del momento di forza (PT) ottenuto tramite l'utilizzo di stimolazioni elettriche a 100 Hz a seguito del test HIT, nel corso delle quattro sessioni di test in un gruppo di calciatori professionisti adulti (barre nere) e un gruppo di calciatori professionisti giovani (barre grigie). *, $P < 0,05$, significativamente diverso da test 1; †, $P < 0,05$, significativamente diverso da test 2.

Tabella 15. Proprietà contrattili degli estensori del ginocchio misurate utilizzando coppie di stimoli elettrici a 100 Hz nel corso delle quattro valutazioni effettuate in stagione in un gruppo di calciatori professionisti adulti e un gruppo di calciatori professionisti giovani.

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	ANOVA	η^2
<i>Adulti Professionisti</i>						
PRE PT ($N \cdot m^{-1}$)	119,8 ± 11,1	120,4 ± 10,5	120,3 ± 14,4	119,0 ± 14,0	0,985	0,01
POST PT ($N \cdot m^{-1}$)	98,0 ± 10,0	101,8 ± 12,3	107,4 ± 13,2 *	108,3 ± 11,7 *†	0,006	0,44
PT decremento (%)	-18,1 ± 4,6	-15,3 ± 8,2	-10,6 ± 6,3 *	-8,8 ± 4,3 *†	0,010	0,41
PRE MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	2,02 ± 0,16	2,05 ± 0,36	1,87 ± 0,16	1,98 ± 0,25	0,218	0,19
POST MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	1,98 ± 0,27	1,93 ± 0,29	1,87 ± 0,23	1,97 ± 0,20	0,255	0,17
MRTD decremento (%)	-1,8 ± 9,4	-5,1 ± 11,9	-0,1 ± 7,0	-0,4 ± 4,7	0,671	0,07
PRE MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	1,64 ± 0,18	1,64 ± 0,16	1,63 ± 0,18	1,50 ± 0,17	0,229	0,18
POST MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	1,35 ± 0,27	1,46 ± 0,22	1,64 ± 0,17 *†	1,58 ± 0,15 *	0,009	0,42
MRTR decremento (%)	-17,2 ± 16,7	-10,4 ± 15,9	2,1 ± 15,2 *	7,1 ± 18,3 *†	0,007	0,43
<i>Giovani Professionisti</i>						
PRE PT ($N \cdot m^{-1}$)	115,7 ± 17,0	111,2 ± 15,3	116,2 ± 16,6	112,6 ± 11,6	0,410	0,08
POST PT ($N \cdot m^{-1}$)	95,5 ± 18,1	96,9 ± 15,6	101,9 ± 17,6	98,8 ± 14,8	0,254	0,11
PT decremento (%)	-17,1 ± 8,3	-13,0 ± 5,6	-12,6 ± 6,6	-12,4 ± 7,9	0,178	0,14
PRE MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	1,98 ± 0,29	1,88 ± 0,18	1,95 ± 0,28	1,94 ± 0,19	0,542	0,06
POST MRTD ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	1,77 ± 0,27	1,70 ± 0,27	1,88 ± 0,35 †	1,86 ± 0,33 †	0,035	0,23
MRTD decremento (%)	-10,4 ± 9,2	-10,0 ± 11,1	-3,7 ± 11,2	-4,6 ± 10,9	0,197	0,13
PRE MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	1,64 ± 0,29	1,57 ± 0,24	1,54 ± 0,28	1,61 ± 0,19	0,342	0,10
POST MRTR ($N \cdot m^{-1} \cdot ms^{-1}$)	1,43 ± 0,37	1,51 ± 0,39	1,67 ± 0,30 *	1,49 ± 0,36	0,009	0,29
MRTR decremento (%)	-13,2 ± 15,3	-4,6 ± 15,0	8,9 ± 12,4 *	-7,7 ± 18,4	<0,001	0,46

PRE, prima della corsa intermittente ad alta intensità; POST, dopo della corsa intermittente ad alta intensità; PT, picco del momento di forza; MRTD, Maximal Rate of Torque Development; MRTR, Maximal Rate of Torque Relaxation. *, $p < 0,05$; significativamente diverso da Test 1; †, $p < 0,05$; significativamente diverso da Test 2.

La media \pm SD dei rapporti 10/100 Hz, misurati prima e dopo il test HIT, nel corso delle varie sessioni di test e relative ai due gruppi di calciatori sono presentate nella tabella 16 mentre i cali percentuali dei rapporti 10/100 Hz sono rappresentate nella figura 14. I valori basali (PRE) dei rapporti 10/100 Hz erano stabili nel gruppo dei giovani calciatori ($P = 0,080$, $p\eta^2 = 0,18$), mentre erano significativamente diminuiti nel gruppo dei calciatori adulti nel corso del Test 2 e del Test 4 rispetto al Test 1 ($P = 0,028$, $p\eta^2 = 0,32$). Al contrario, i rapporti 10/100 Hz POST erano stabili nella stagione nel gruppo di calciatori adulti ($P = 0,601$, $p\eta^2 = 0,08$), mentre erano significativamente aumentati nel gruppo dei calciatori giovani nel corso del Test 2, Test 3 e Test 4 rispetto al Test 1 ($P = 0,012$, $p\eta^2 = 0,28$). Infine, i decrementi percentuali di questo parametro erano ancora una volta stabili nel corso della stagione nel gruppo di calciatori adulti ($P = 0,094$, $p\eta^2 = 0,26$), mentre erano significativamente diminuiti nel gruppo dei calciatori giovani nel corso del Test 2, Test 3 e Test 4 rispetto al Test 1 ($P < 0,001$, $p\eta^2 = 0,46$).

Tabella 16. Rapporti 10/100 Hz nel corso delle quattro valutazioni effettuate in stagione in un gruppo di calciatori professionisti adulti e un gruppo di calciatori professionisti giovani.

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	ANOVA	$p\eta^2$
<i>Adulti Professionisti</i>						
PRE	1,03 ± 0,09	0,96 ± 0,07 *	0,97 ± 0,05	0,93 ± 0,15 *	0,028	0,32
POST	0,78 ± 0,10	0,76 ± 0,09	0,80 ± 0,05	0,76 ± 0,13	0,601	0,08
Decremento (%)	-24,4 ± 9,4	-21,3 ± 7,6	-17,8 ± 3,0	-18,1 ± 4,3	0,094	0,26
<i>Giovani Professionisti</i>						
PRE	0,96 ± 0,11	0,93 ± 0,10	0,90 ± 0,11	0,91 ± 0,12	0,080	0,18
POST	0,63 ± 0,17	0,70 ± 0,13 *	0,70 ± 0,12 *	0,72 ± 0,12 *	0,012	0,28
Decremento (%)	-34,7 ± 12,1	-25,2 ± 7,1 *	-22,4 ± 12,5 *	-20,9 ± 6,5 *	<0,001	0,46

PRE, prima della corsa intermittente ad alta intensità; POST, dopo della corsa intermittente ad alta intensità. *, $p < 0,05$; significativamente diverso da Test 1.

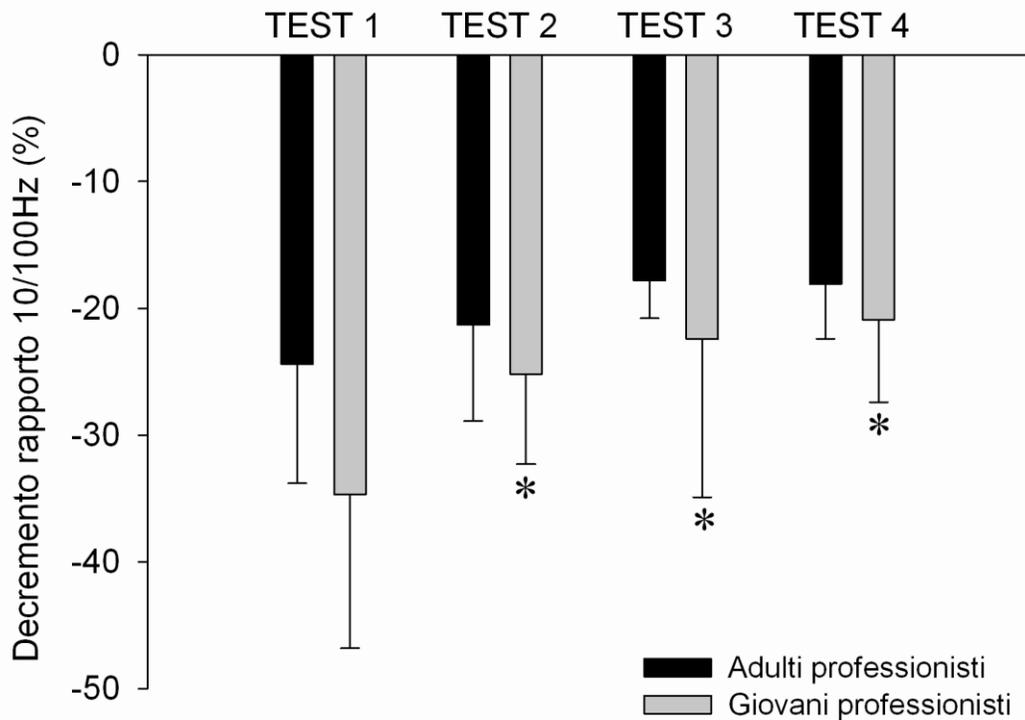


Figura 14. Decremento percentuale dei rapporti 10/100 Hz a seguito del test HIT, nel corso delle quattro sessioni di test in un gruppo di calciatori professionisti adulti (barre nere) e un gruppo di calciatori professionisti giovani (barre grigie). *, $P < 0,05$, significativamente diverso da test 1.

Discussione

Lo scopo di questo studio era quello di monitorare le variazioni stagionali dell'efficienza neuromuscolare dei KE in condizioni di riposo e della fatica neuromuscolare periferica indotta da un esercizio di corsa intermittente in due gruppi di calciatori professionisti: adulti e giovani. Per quanto riguarda le proprietà contrattili dei KE in condizioni basali, è stata osservata una parziale riduzione di efficienza neuromuscolare nella seconda parte del periodo competitivo sia nel gruppo degli adulti sia nel gruppo dei giovani calciatori professionisti (PRE MRTD a 1 Hz e a 10 Hz). L'analisi dei parametri POST, ha confermato una riduzione dei livelli di fatica di tipo high-frequency nel corso del periodo competitivo nel gruppo dei calciatori adulti (POST PT e MRTR a 100 Hz). Nel gruppo dei giovani, è stata invece individuata una riduzione sia dei livelli di high-frequency fatigue sia di quelli low-frequency nel corso del periodo competitivo (POST MRTD e MRTR a 100 Hz, POTS PT a 10 Hz e rapporto 10/100 Hz). Considerando i cali percentuali di vari parametri, è stata confermata una miglior capacità di sopportazione dell'esercizio di corsa intermittente da un punto di vista neuromuscolare, sia per il gruppo degli adulti sia per quello dei giovani calciatori professionisti.

I parametri basali

Nel gruppo degli adulti, è stato possibile alcune variazioni dei parametri basali che possono suggerire la presenza di fatica di tipo low-frequency. Infatti, i valori PRE di MRTD a 1 Hz e 10 Hz erano significativamente minori nel corso dei test effettuati durante il periodo competitivo (Test 3 e Test 4) rispetto alle valutazioni effettuate prima e dopo il periodo preparatorio (Test 1 e Test 2). Inoltre, il rapporto 10/100 Hz erano più bassi nel corso del Test 2 e del Test 4 rispetto al Test 1. La parziale riduzione di efficienza neuromuscolare dei KE potrebbe essere legata alla fatica che si accumula nel corso della stagione agonistica (o anche del solo periodo preparatorio per il rapporto 10/100 Hz) a causa del sommarsi dei carichi determinati dagli allenamenti e dalle competizioni (Faude *et al.*, 2011). Infatti, è stato dimostrato che è possibile osservare una riduzione della capacità di esprimere la massima potenza anaerobica (McLean *et al.*, 2012) quando i giocatori, nel corso della stagione, sono sottoposti ad elevati carichi di lavoro (~2250 vs ~1600 au). È importante ricordare che, queste informazioni, sono state raccolte su giocatrici femmine di livello amatoriale e in futuro sarebbe utile avere a disposizione le stesse indicazioni specifiche per la popolazione di calciatori professionisti. Nonostante questo limite, è possibile ipotizzare che la riduzione della potenza massima potrebbe essere parzialmente causata dalla ridotta efficienza neuromuscolare a livello periferico. Tuttavia, questo

ipotetico legame diretto tra la ridotta funzionalità periferica e la diminuzione della potenza massima dovrà essere verificata in futuro con studi dedicati.

Nel gruppo dei giovani, la ridotta efficienza neuromuscolare in condizioni basali era circoscritta alla sola riduzione dei valori di PRE MRTD a 1 Hz e 100 Hz (rapporti 10/100 Hz stabili). Di conseguenza, è possibile ipotizzare che la fatica accumulata nel corso della stagione dagli atleti di questo gruppo era inferiore rispetto a quella degli adulti. Inoltre, la riduzione era già presente al termine del periodo preparatorio (Test 2) e rimaneva tale nel corso di tutto il periodo competitivo. Conseguentemente, il fenomeno osservato sembrava principalmente determinato dal carico di lavoro sostenuto nel periodo preparatorio (invece della somma degli allenamenti e delle partite nel periodo competitivo come avveniva per gli adulti). Questi risultati suggeriscono che, nel corso del periodo preparatorio, potrebbe essere molto importante monitorare con particolare attenzione il carico proposto ai giovani atleti al fine di evitare eccessivi squilibri tra stress (stimolo) e recupero che potrebbe portare a situazioni di overreaching o addirittura di overtraining (Brink *et al.*, 2012; Schmikli *et al.*, 2012).

I parametri sotto fatica

Nel gruppo degli adulti, gli unici parametri POST che cambiavano significativamente erano i valori di PT e MRTR a 100 Hz. Queste variabili erano generalmente maggiori nel corso del periodo competitivo (Test 3 e Test 4) rispetto al periodo preparatorio (Test 1 e Test 2). Dato che l'esercizio HIT veniva proposto alla stessa intensità assoluta (velocità media $18 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) è possibile affermare che i calciatori adulti mostravano minori livelli di high-frequency fatigue nel corso della stagione rispetto ai periodi iniziali. Nel corso della stagione, era stato anche determinato l'accumulo di La^- e H^+ oltre alla RPE a seguito del test HIT. Queste analisi biochimiche e la RPE, confermavano che l'intensità necessaria per sostenere il carico standardizzato dell'HIT era minore nel periodo competitivo rispetto al periodo preparatorio. La minor intensità di esercizio, molto probabilmente causava un minor disturbo elettrolitico all'interno del muscolo (e.g. minor accumulo di K^+ nello spazio interstiziale) (Shushakov *et al.*, 2007) che a sua volta limitava i livelli di high-frequency fatigue cui incorrevano i giocatori adulti. Tuttavia, è anche importante notare che gli unici parametri POST che cambiavano significativamente nel corso dell'anno erano i valori di PT e MRTR a 100 Hz. Questo aspetto potrebbe anche essere legato alla scarsa sensibilità delle misure effettuate esclusivamente dopo il test HIT.

Nel gruppo dei giovani calciatori, alcuni parametri misurati a 100 Hz (MRTD e MRTR) cambiavano significativamente nel corso dell'anno (suggerendo anche per questo gruppo una riduzione

dei livelli di high-frequency fatigue confermati anche dal minor accumulo di La^- e H^+). Tuttavia, nei giovani, miglioravano anche i valori di POST PT a 10 Hz e POST rapporti 10/100 Hz confermando minori livelli anche di low-frequency fatigue. Di conseguenza, oltre ad un miglioramento dell'eccitabilità muscolare è possibile ipotizzare un generale miglioramento dei processi di rilascio e riassorbimento del Ca^{2+} e/o un miglioramento della sensibilità delle fibre muscolari alla presenza di Ca^{2+} in condizioni POST HIT (Allen *et al.*, 2008). Dato che questa particolare tipologia di fatica sembra essere particolarmente sensibile agli esercizi di tipo eccentrico (Jones *et al.*, 1989), si potrebbe speculare che gli adattamenti fisiologici a cui incorrono i giovani nel corso di una stagione agonistica sono più marcati ed estesi di quelli a cui vanno incontro i calciatori adulti. Tuttavia, questa speculazione andrebbe confermata con studi futuri. Anche in questo gruppo, le variabili POST significativamente influenzate dalla stagione agonistica erano relativamente poche confermando l'ipotesi della limitata sensibilità di questi parametri di efficienza periferica quando gli stessi vengono misurati esclusivamente dopo la fine del test HIT.

I cali percentuali

In generale, i cali percentuali dei vari parametri considerati mostravano variazioni stagionali maggiori rispetto a quanto avveniva per valori PRE o POST presi singolarmente. Infatti nel gruppo dei professionisti adulti, i cali percentuali di PT e MRTD a 1 Hz, PT e MRTD a 10 Hz e PT e MRTR a 100 Hz erano minori nel periodo agonistico rispetto al periodo preparatorio. Questi risultati suggeriscono, che la fatica neuromuscolare periferica indotta dall'HIT era determinata da una combinazione di high- e low-frequency fatigue con livelli diminuiti nella seconda parte dell'anno rispetto alla prima. In maniera simile, per i giovani calciatori, i cali percentuali di PT a 1 Hz, PT e MRTR a 10 Hz, MRTR a 100 Hz e rapporti 10/100 Hz erano generalmente minori nel periodo competitivo rispetto al periodo preparatorio. Quindi sia i livelli di high- che quelli di low-frequency fatigue erano diminuiti nel corso dell'anno (Jones, 1996). Analizzando collettivamente i risultati POST e i cali percentuali è possibile concludere che, in entrambe le popolazioni di calciatori professionisti (adulti e giovani) coinvolte nello studio, il carico di lavoro (allenamento e partite) svolto nel corso dell'anno limita la fatica neuromuscolare periferica indotta dal test HIT (riduzione combinata di high- e low-frequency fatigue) con il gruppo dei giovani che mostra una riduzione di fatica di tipo low-frequency più marcata. L'alterazione di alcuni parametri basali (in particolare nel gruppo di adulti) potrebbe essere indicativa dei livelli di fatica crescente che si verificano nel corso dell'anno.

Capitolo 7
CONCLUSIONI

La fatica è un fenomeno multifattoriale che può essere definito come: “un acuto deterioramento della performance che include sia un aumento della percezione dello sforzo necessaria per produrre una determinata forza o potenza sia eventualmente un’incapacità di produrre la massima forza o potenza” (Gandevia, 2001). La fatica può essere classificata come centrale quando la sua origine è prossimale rispetto alla giunzione neuromuscolare e periferica quando la sua origine è distale rispetto alla giunzione stessa (Gandevia, 2001). Nel calcio è possibile distinguere almeno tre specifiche tipologie di fatiche: quella di tipo transitorio che si genera a seguito delle fasi più impegnative del match, quella nella fase finale della partita e quella di tipo permanente ovvero quella che persiste nelle ore o nei giorni successivi al termine dell’incontro (Mohr *et al.*, 2005). L’obiettivo del presente lavoro è stato quello di indagare gli aspetti centrali e periferici della fatica specifica nel gioco del calcio.

Recenti studi hanno dimostrato che la forza massima, la capacità di salto e di sprint sono significativamente ridotte a seguito della partita (Krustrup *et al.*, 2006b; Andersson *et al.*, 2008; Ascensao *et al.*, 2008; Ispirlidis *et al.*, 2008; Thorlund *et al.*, 2009). Il tempo necessario per recuperare completamente queste qualità è a volte molto lungo (più di 72 ore) (Ascensao *et al.*, 2008; Ispirlidis *et al.*, 2008). Tuttavia, le informazioni relative al tempo di recupero sono state raccolte su giocatori amatori o di basso livello e le cinetiche di recupero negli atleti professionisti di alto livello non sono state ancora chiarite. La fatica determinata da una partita di calcio può avere un effetto negativo anche sull’abilità di effettuare con precisione un passaggio (Rampinini *et al.*, 2008) ma, ancora una volta, le informazioni raccolte non sono relative ai giocatori top-level. Nel capitolo 2 è stata analizzata la fatica permanente indotta da una partita di calcio giocata da atleti di alto livello cercando di chiarire l’influenza dei vari meccanismi fisiologici collegati a questo fenomeno. Inoltre, nello stesso capitolo, sono state investigate le variabili che contribuiscono alla qualità del recupero post-gara, elemento fondamentale per la prestazione ottimale del giocatore nel calcio moderno.

I risultati del presente studio hanno dimostrato che una partita disputata da giocatori di alto livello inducono una riduzione della MVC e della capacità di sprint. Al contrario, nonostante l’incremento della RPE e a differenza di quanto avviene per i giovani calciatori amatori (Rampinini *et al.*, 2008), l’abilità di effettuare passaggi corti resta stabile. In questa particolare popolazione di atleti, 48 ore di riposo sono un tempo sufficiente al fine di ottenere un completo recupero di tutte le qualità. Inoltre, la fatica indotta da una partita di calcio è determinata da una combinazione di fattori di tipo centrale e

periferico. Infatti, sia la %VA sia il RMS/PPA, misurati nel corso del test di MVC, erano ridotti immediatamente dopo la partita così come le proprietà contrattili del muscolo determinate tramite l'utilizzo di stimolazioni elettriche passive (in particolare utilizzando le stimolazioni doppie a 10 Hz). I più alti livelli di fatica centrale sono stati trovati nei giocatori che mostravano anche un elevato decremento di MVC e capacità di sprint; al contrario i giocatori che riportavano il maggior incremento della percezione di dolore muscolare erano quelli con i più marcati livelli di fatica periferica. Le variabili negativamente influenzate dalla partita ritornano a livelli basali 48 ore dopo la stessa, conseguentemente il tempo di recupero post-gara sembra essere inferiori negli atleti di alto livello rispetto a quelli di più basso livello competitivo. Studi futuri dovranno essere condotti al fine di indagare l'eventuale effetto cumulativo della ripetizione di diverse partite sull'evolversi della fatica. Sarà anche importante cercare di verificare l'influenza dei fattori centrali e dei fattori periferici sull'insorgenza della fatica indotta da diverse partite disputate con un tempo di recupero relativamente breve (e.g. 3 giorni come avviene per le squadre che partecipano alle competizioni nazionali e a quelle europee).

Come accennato in precedenza, la fatica che si genera nel corso di una partita può avere effetti negativi sull'abilità fisica dei calciatori (Krustrup *et al.*, 2006b) ma anche sulla loro abilità tecnica (Rampinini *et al.*, 2008; Rostgaard *et al.*, 2008). Alcune osservazioni preliminari hanno suggerito che la frequenza dei gol realizzati nel corso dei match aumenta con il passare del tempo (Abt *et al.*, 2002; Armatas *et al.*, 2009). Questo specifico pattern potrebbe suggerire l'esistenza di un legame tra l'incremento dei livelli di fatica dei giocatori e la frequenza dei gol realizzati. Tuttavia, queste osservazioni preliminari sono basate sull'analisi di campionati minori o su un numero di partite abbastanza limitato. Nel capitolo 3, è stata esaminata la frequenza dei gol realizzati nel corso dei diversi momenti della partita nei quattro maggiori campionati nazionali europei in tre stagioni consecutive.

I risultati di questo studio hanno dimostrato che l'incidenza dei gol realizzati, nel corso delle partite ufficiali dei quattro maggiori campionati nazionali europei, è maggiore nel secondo tempo rispetto al primo. Inoltre, dividendo la partita in quarti gioco, la frequenza dei gol realizzati è maggiore negli ultimi quindici minuti di gioco. La nota riduzione della capacità prestativa dei giocatori nel corso della partita (Krustrup *et al.*, 2006b) potrebbe avere un effetto negativo anche sull'efficacia con cui i

giocatori marcano gli avversari, concedendo maggiori opportunità di realizzazione nel corso del gioco. Tuttavia, nel presente studio, non sono state raccolte informazioni relative alla capacità atletica dei giocatori nel corso delle partite. Conseguentemente, studi futuri dovranno verificare l'ipotesi dell'esistenza di un legame diretto tra evolversi dei livelli di fatica e realizzazione dei gol.

Tra le diverse qualità atletiche importanti per la performance fisica del calciatore c'è sicuramente la Repeat-Sprint Ability (RSA) (Bishop *et al.*, 2011; Girard *et al.*, 2011). La comprensione dei meccanismi della fatica che si sviluppano nel corso delle prove di RSA può essere utile per attuare delle strategie di allenamento efficaci nel ritardare l'insorgenza della fatica e quindi può essere utile per il miglioramento della prestazione (Girard *et al.*, 2011). La fatica indotta da un esercizio di RSA è causata da una combinazione di fattori centrali e periferici (Bishop, 2012). Tuttavia, numerosi studi hanno suggerito che il calo di potenza che si verifica durante le prove di sprint intermittenti non è primariamente causato da un'inibizione a livello centrale ma molto più probabilmente da fattori di tipo periferico (Mendez-Villaneuva *et al.*, 2007; Racinais *et al.*, 2007; Mendez-Villaneuva *et al.*, 2008b; Billaut and Bishop, 2012; Bishop, 2012; Girard *et al.*, 2013). La fatica periferica può essere classificata come high-frequency o low-frequency, entrambe queste due tipologie sembrano essere presenti nella fatica periferica dei flessori plantari a seguito di una prova di RSA effettuata di corsa (Perrey *et al.*, 2010). Al momento però nessuno studio ha investigato la fatica periferica indotta da RSA in più di un gruppo muscolare (e.g. flessori plantari ed estensori del ginocchio). La low-frequency fatigue sembra essere prevalente a seguito di esercizi caratterizzati da contrazioni eccentriche o esercizi effettuati ad alta intensità che prevedono il ciclo stiramento-accorciamento (Martin *et al.*, 2005; Girard *et al.*, 2008). Queste evidenze suggeriscono che l'esercizio di RSA effettuato correndo dovrebbe causare un maggior affaticamento di tipo low-frequency rispetto ad un esercizio di RSA svolto pedalando. Tuttavia, la performance nel corso di prove di RSA cycling cala maggiormente rispetto a quanto succede nel corso di prove di RSA running (Fitzsimons *et al.*, 1993; Bundle and Weyand, 2012) suggerendo un maggior livello di fatica periferica nelle prove di RSA cycling. Ad oggi però nessuno studio ha comparato direttamente la fatica periferica indotta da protocolli di RSA cycling rispetto a RSA running. Nel capitolo 4, è stata confrontata la fatica periferica in due gruppi muscolari (estensori del ginocchio e flessori plantari) indotta da due esercizi di RSA caratterizzati dagli stessi tempi di lavoro e recupero ma da una diversa tipologia di esercizio: pedalare (cycling) vs correre (running).

I risultati hanno indicato che il test di RSA cycling induce un maggior decremento delle proprietà contrattili degli estensori del ginocchio a tutte le frequenze di stimolazione rispetto al test di RSA running. Al contrario, non sono state individuate differenze importanti nell'affaticamento dei flessori plantari. Questi risultati sono anche supportati dalla maggior percezione dello sforzo locale (RPE leg) riportata a seguito del test RSA cycling e dalla tendenza alla maggior percezione dello sforzo generale (RPE overall). Tutti gli indicatori di low-frequency fatigue degli estensori del ginocchio (rapporti di PT) erano ridotti in maniera simile tra le due condizioni. Alcuni rapporti dei flessori plantari (10/100 Hz, 20/50 Hz e 20/100 Hz) suggerivano la maggior presenza di fatica di tipo low-frequency a seguito del test RSA cycling. Tutte queste differenze non erano accompagnate da alterazioni a livello ematico o risposte cardiache differenti tra le due condizioni. Il maggior affaticamento degli estensori del ginocchio rispetto ai flessori plantari potrebbe essere parzialmente legato alla differente composizione di fibre dei due gruppi muscolari o al differente livello di attivazione muscolare nel corso delle prove. Vista la tipologia di fatica periferica indotta dalle diverse tipologie di esercizi di RSA, studi futuri dovranno essere condotti al fine di individuare le strategie di allenamento più efficaci per il miglioramento di questa particolare qualità atletica.

Il miglioramento delle tecniche di elettrostimolazione consentono oggi la quantificazione della fatica periferica indipendentemente da quella centrale. La fatica periferica può essere divisa in high- e low-frequency (Jones, 1996). La high-frequency fatigue è definita come la perdita di forza utilizzando alte frequenze di stimolazione ed è una tipologia di fatica che si recupera abbastanza velocemente. Si ritiene che la high-frequency fatigue sia causata da una alterazione della propagazione del potenziale d'azione sul sarcolemma o sui tubuli t (Jones, 1996). La low-frequency fatigue (anche chiamata long-lasting fatigue) è caratterizzata da un recupero molto lento (ore o addirittura giorni) (Jones, 1996) ed è associata ad un fallimento del processo eccitamento-contrazione (Perrey *et al.*, 2010). Il gold-standard per la valutazione delle funzioni muscolari a livello periferico prevede l'utilizzo di treni di impulsi sopramassimali che inducono contrazioni di tipo tetanico (Edwards *et al.*, 1977). Tuttavia, questa metodologia è particolarmente dolorosa e quindi il suo utilizzo pratico è abbastanza limitato (Martin *et al.*, 2004). Recentemente, è stato suggerito che l'utilizzo di coppie di stimoli sono un valido surrogato delle contrazioni tetaniche considerate il gold-standard (Verges *et al.*, 2009). Solo uno studio ha determinato la ripetibilità delle proprietà contrattili del muscolo in condizioni di fatica. Tuttavia, la

tipologia di esercizio affaticante utilizzata non può essere considerata sport-specifica nella maggior parte dei casi. Infatti, il protocollo prevedeva l'utilizzo di una contrazione isometrica massimale prolungata (2 minuti) (Place *et al.*, 2007). Nel caso in cui si voglia utilizzare la stimolazione elettrica per la quantificazione della fatica periferica nel monitoraggio degli atleti, sarebbe necessario effettuare degli studi metodologici che stabiliscano la ripetibilità della fatica periferica causata da esercizi maggiormente specifici rispetto alla disciplina sportiva. Per questo motivo nel capitolo 5 è stata verificata la ripetibilità della funzionalità neuromuscolare periferica degli estensori del ginocchio in condizioni di riposo e in condizioni di fatica utilizzando le stimolazioni elettriche transcutanee doppie. La fatica è stata indotta utilizzando un esercizio di corsa intermittente ad alta intensità. L'esercizio di corsa intermittente ad alta intensità è stato scelto al fine di riprodurre un affaticamento muscolare simile a quello che i giocatori hanno nel corso della prestazione. Infatti, in questa tipologia di esercizio è presente un marcato contributo sia aerobico sia anaerobico ed è necessaria la produzione di buoni livelli di forza muscolare (Bangsbo, 1994a).

Dai risultati di questo studio è stato possibile concludere che la quantificazione delle proprietà contrattili del muscolo mostra buoni livelli di ripetibilità sia in condizioni di riposo sia in condizioni di fatica, in particolare a seguito di una sessione di familiarizzazione. I risultati di questo studio uniti a quanto riportato precedentemente (Place *et al.*, 2007), supportano l'utilizzo di questa tecnica per la quantificazione delle proprietà contrattili del muscolo a riposo e in condizioni di fatica anche in condizioni più difficilmente standardizzabili come quelle del campo. Oltre alla ripetibilità, studi futuri dovranno stabilire la sensibilità e la validità del monitoraggio della fatica periferica per l'ottimizzazione della performance degli atleti. Ad esempio, sarà necessario effettuare un monitoraggio prolungato (e.g. una stagione agonistica) di questo parametro al fine di verificare l'influenza dell'allenamento svolto dal calciatore nel corso dell'anno al fine di limitare la fatica periferica indotta da un esercizio di corsa intermittente ad alta intensità.

La fatica è specifica rispetto alla tipologia, alla durata e all'intensità dell'esercizio che si effettua (Millet and Lepers, 2004). Tuttavia è stato dimostrato che la fatica di tipo centrale sembra essere più importante quando gli esercizi sono molto prolungati nel tempo. Al contrario, la fatica di tipo periferico sembra essere maggiormente importante con gli esercizi sono relativamente brevi ma intensi (Taylor and Gandevia, 2008). Nel calcio è possibile distinguere almeno tre tipologie di fatiche: quella di tipo

transitorio che si genera a seguito delle fasi più impegnative del match, quella nella fase finale della partita e quella di tipo permanente ovvero quella che persiste nelle ore o nei giorni successivi al termine dell'incontro (Mohr *et al.*, 2005). La fatica di tipo transitorio è quella che si genera a seguito delle fasi più intense della partita. Utilizzando i dati di time-motion-analysis è stato evidenziato che a seguito dei 5 minuti di partita in cui si registra la maggior quantità di lavoro ad alta intensità seguono sempre 5 minuti in cui il lavoro ad alta intensità è inferiore al valore medio del match (Mohr *et al.*, 2003; Bradley *et al.*, 2009). Se a questo si aggiunge che la capacità di effettuare sprint ripetuti risulta peggiorata dopo aver svolto un breve periodo di lavoro ad alta intensità (Krustrup *et al.*, 2006b) si può arrivare a concludere che i calciatori attraversano dei momenti di fatica transitoria durante la partita. Quali siano le cause di questa riduzione di performance non è ancora del tutto chiaro. In questo contesto, nessuno studio si è ancora occupato di investigare la fatica periferica di tipo low-frequency e quella di tipo high-frequency indotta da un esercizio di corsa intermittente ad alta intensità in un gruppo di calciatori professionisti. Per questo motivo, nel capitolo 6, sono state determinate le variazioni stagionali dell'efficienza (in condizioni di riposo) e della fatica (a seguito di un esercizio di corsa intermittente) neuromuscolare periferica a livello degli estensori del ginocchio in un gruppo di calciatori professionisti adulti e uno di professionisti giovani.

I risultati di questo studio hanno dimostrato che le proprietà contrattili basali degli estensori del ginocchi sono parzialmente peggiorate nella seconda parte del periodo competitivo, sia nel gruppo degli adulti sia nel gruppo dei giovani calciatori professionisti (PRE MRTD a 1 Hz e a 10 Hz). L'analisi dei parametri POST, ha confermato una riduzione dei livelli di fatica di tipo high-frequency nel corso del periodo competitivo nel gruppo dei calciatori adulti (POST PT e MRTR a 100 Hz). Nel gruppo dei giovani è stata invece individuata una riduzione sia dei livelli di high-frequency fatigue sia di quelli low-frequency nel corso del periodo competitivo (POST MRTD e MRTR a 100 Hz, POTS PT a 10 Hz e rapporto 10/100 Hz). Considerando i cali percentuali di vari parametri, è stata confermata una miglior capacità di sopportazione dell'esercizio di corsa intermittente da un punto di vista neuromuscolare, sia per il gruppo degli adulti sia per quello dei giovani calciatori professionisti.

In conclusione, la fatica specifica nel gioco del calcio è determinata da una combinazione di fattori di tipo centrale e di tipo periferico. La fatica centrale è particolarmente evidente immediatamente dopo e nelle ore che seguono una partita (fatica permanente). La fatica periferica è predominante quando si

analizzano gli effetti delle componenti della prestazione relativamente brevi ma intense (fatica transitoria). La fatica periferica è sia di tipo high-frequency sia di tipo low-frequency: quest'ultima sembra più marcata nei giovani. Le strategie di allenamento per l'ottimizzazione della performance dei calciatori dovrebbero considerare tutti questi aspetti. Conseguentemente, al fine di limitare la fatica di tipo centrale, occorrerebbe prestare particolare attenzione al volume del lavoro svolto, prevedendo delle sessioni di allenamento sufficientemente lunghe. L'abilità tecnica e tattica dei calciatori andrebbe allenata anche in condizioni di fatica centrale, dato che è questa la situazione che si viene a creare nel corso delle partite. Gli aspetti motivazionali, certamente coinvolti nell'evoluzione dei livelli di fatica, andrebbero considerati con grande cura da parte degli staff tecnici, avvalendosi anche di consulenze specialistiche di settore. In particolari condizioni ambientali (caldo umide), la termoregolazione potrebbe diventare l'elemento limitante della prestazione in considerazione dello stretto legame che esiste tra fatica centrale ed eccessiva temperatura corporea. Per quanto riguarda la fatica periferica, si conferma la necessità dell'allenamento ad alta intensità al fine di limitare i disturbi elettrolitici a livello muscolare susseguenti alle fasi intense della partita (high-frequency fatigue). Inoltre, l'allenamento della forza di tipo eccentrico, costituisce un elemento fondamentale della preparazione dei calciatori al fine di limitare il danno muscolare da esercizio (low-frequency fatigue).

BIBLIOGRAFIA

- Abt, G. A., Dickson, G. and Mummery, W. K. (2002). Goal scoring patterns over the course of a match: An analysis of the Australian National Soccer League. In *Science and Football IV* (edited by W. Spinks, T. Reilly and A. Murphy), pp. 107-111. London: Routledge.
- Ali, A., Eldred, J., Hirst, M., Hulse, M., McGregor, S., Strudwick, A. and Williams, C. (2003). The reliability and validity of the modified Loughborough Soccer Passing Test. *J Sports Sci*, **21**(4), 258.
- Allen, D. G. (2001). Eccentric muscle damage: mechanisms of early reduction of force. *Acta Physiol Scand*, **171**(3), 311-9.
- Allen, D. G., Lamb, G. D. and Westerblad, H. (2008). Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiol Rev*, **88**(1), 287-332.
- Amann, M., Romer, L. M., Pegelow, D. F., Jacques, A. J., Hess, C. J. and Dempsey, J. A. (2006). Effects of arterial oxygen content on peripheral locomotor muscle fatigue. *J Appl Physiol*, **101**(1), 119-27.
- Andersson, H., Raastad, T., Nilsson, J., Paulsen, G., Garthe, I. and Kadi, F. (2008). Neuromuscular fatigue and recovery in elite female soccer: effects of active recovery. *Med Sci Sports Exerc*, **40**(2), 372-80.
- Armatas, V., Yiannakos, A., Papadopoulou, S. and Skoufas, D. (2009). Evaluation of goals scored in top ranking soccer matches: Greek "Superleague" 2006-07. *Serb J Sports Sci*, **3**(1), 39-43.
- Ascensao, A., Rebelo, A., Oliveira, E., Marques, F., Pereira, L. and Magalhaes, J. (2008). Biochemical impact of a soccer match - analysis of oxidative stress and muscle damage markers throughout recovery. *Clin Biochem*, **41**(10-11), 841-51.
- Atkinson, G. and Nevill, A. M. (1998). Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. *Sports Med*, **26**(4), 217-38.
- Avela, J., Kyrolainen, H. and Komi, P. V. (1999). Altered reflex sensitivity after repeated and prolonged passive muscle stretching. *J Appl Physiol*, **86**(4), 1283-91.
- Balsom, P. D., Seger, J. Y., Sjodin, B. and Ekblom, B. (1992). Maximal-intensity intermittent exercise: effect of recovery duration. *Int J Sports Med*, **13**(7), 528-33.
- Bangsbo, J. (1994a). Energy demands in competitive soccer. *J Sports Sci*, **12 Special Issue**, S5-12.
- Bangsbo, J. (1994b). *Fitness Training in Football*. Bagsværd: HO+Storm.
- Bangsbo, J. (1994c). The physiology of soccer--with special reference to intense intermittent exercise. *Acta Physiol Scand Suppl*, **619**, 1-155.

- Bangsbo, J., Madsen, K., Kiens, B. and Richter, E. A. (1996). Effect of muscle acidity on muscle metabolism and fatigue during intense exercise in man. *J Physiol*, **495** (Pt 2), 587-96.
- Barry, B. K. and Enoka, R. M. (2007). The neurobiology of muscle fatigue: 15 years later. *Integr Comp Biol*, **47**(4), 465-73.
- Behm, D. G. and St-Pierre, D. M. (1997). Effects of fatigue duration and muscle type on voluntary and evoked contractile properties. *J Appl Physiol*, **82**(5), 1654-61.
- Billaut, F., Basset, F. A. and Falgairette, G. (2005). Muscle coordination changes during intermittent cycling sprints. *Neurosci Lett*, **380**(3), 265-9.
- Billaut, F. and Bishop, D. (2009). Muscle fatigue in males and females during multiple-sprint exercise. *Sports Med*, **39**(4), 257-78.
- Billaut, F. and Bishop, D. J. (2012). Mechanical work accounts for sex differences in fatigue during repeated sprints. *Eur J Appl Physiol*, **112**(4), 1429-36.
- Billaut, F. and Smith, K. (2010). Prolonged repeated-sprint ability is related to arterial O₂ desaturation in men. *Int J Sports Physiol Perform*, **5**(2), 197-209.
- Bishop, D. (2012). Fatigue during intermittent-sprint exercise. *Clin Exp Pharmacol Physiol*, **39**, 836-841.
- Bishop, D. and Claudius, B. (2005). Effects of induced metabolic alkalosis on prolonged intermittent-sprint performance. *Med Sci Sports Exerc*, **37**(5), 759-67.
- Bishop, D. and Edge, J. (2006). Determinants of repeated-sprint ability in females matched for single-sprint performance. *Eur J Appl Physiol*, **97**(4), 373-9.
- Bishop, D., Edge, J., Davis, C. and Goodman, C. (2004a). Induced metabolic alkalosis affects muscle metabolism and repeated-sprint ability. *Med Sci Sports Exerc*, **36**(5), 807-13.
- Bishop, D., Edge, J. and Goodman, C. (2004b). Muscle buffer capacity and aerobic fitness are associated with repeated-sprint ability in women. *Eur J Appl Physiol*, **92**(4-5), 540-7.
- Bishop, D., Girard, O. and Mendez-Villanueva, A. (2011). Repeated-sprint ability - part II: recommendations for training. *Sports Med*, **41**(9), 741-56.
- Bishop, D., Lawrence, S. and Spencer, M. (2003). Predictors of repeated-sprint ability in elite female hockey players. *J Sci Med Sport*, **6**(2), 199-209.
- Bishop, D. and Spencer, M. (2004). Determinants of repeated-sprint ability in well-trained team-sport athletes and endurance-trained athletes. *J Sports Med Phys Fitness*, **44**(1), 1-7.

- Blackler, S. D., Fallowfield, J. L. and Willems, M. E. (2013). Intra- and interday reliability of voluntary and electrically stimulated isometric contractions of the quadriceps femoris. *J Electromyogr Kinesiol*, **23**(4), 886-91.
- Borg, G. (1998). *Borg's Perceived Exertion and Pain Scales*. Champaign, Illinois: Human Kinetics.
- Bradley, P. S., Carling, C., Gomez Diaz, A., Hood, P., Barnes, C., Ade, J., Boddy, M., Krstrup, P. and Mohr, M. (2013). Match performance and physical capacity of players in the top three competitive standards of English professional soccer. *Hum Mov Sci*, **32**(4), 808-21.
- Bradley, P. S., Sheldon, W., Wooster, B., Olsen, P., Boanas, P. and Krstrup, P. (2009). High-intensity running in English FA Premier League soccer matches. *J Sports Sci*, **27**(2), 159-68.
- Brink, M. S., Visscher, C., Coutts, A. J. and Lemmink, K. A. (2012). Changes in perceived stress and recovery in overreached young elite soccer players. *Scand J Med Sci Sports*, **22**(2), 285-92.
- Buchheit, M., Cormie, P., Abbiss, C. R., Ahmaidi, S., Nosaka, K. K. and Laursen, P. B. (2009). Muscle deoxygenation during repeated sprint running: Effect of active vs. passive recovery. *Int J Sports Med*, **30**(6), 418-25.
- Bundle, M. W. and Weyand, P. G. (2012). Sprint exercise performance: does metabolic power matter? *Exerc Sport Sci Rev*, **40**(3), 174-82.
- Cairns, S. P. and Dulhunty, A. F. (1995). High-frequency fatigue in rat skeletal muscle: role of extracellular ion concentrations. *Muscle Nerve*, **18**(8), 890-8.
- Cairns, S. P., Knicher, A. J., Thompson, M. W. and Sjogaard, G. (2005). Evaluation of models used to study neuromuscular fatigue. *Exerc Sport Sci Rev*, **33**(1), 9-16.
- Cheung, K., Hume, P. and Maxwell, L. (2003). Delayed onset muscle soreness : treatment strategies and performance factors. *Sports Med*, **33**(2), 145-64.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* Lawrence Erlbaum Associates.
- Cole, M. A. and Brown, M. D. (2000). Response of the human triceps surae muscle to electrical stimulation during varying levels of blood flow restriction. *Eur J Appl Physiol*, **82**(1-2), 39-44.
- Dawson, B., Goodman, C., Lawrence, S., Preen, D., Polglaze, T., Fitzsimons, M. and Fournier, P. (1997). Muscle phosphocreatine repletion following single and repeated short sprint efforts. *Scand J Med Sci Sports*, **7**(4), 206-13.
- Decorte, N., Lafaix, P. A., Millet, G. Y., Wuyam, B. and Verges, S. (2010). Central and peripheral fatigue kinetics during exhaustive constant-load cycling. *Scand J Med Sci Sports*, **22**(3), 381-91.

- Drust, B., Rasmussen, P., Mohr, M., Nielsen, B. and Nybo, L. (2005). Elevations in core and muscle temperature impairs repeated sprint performance. *Acta Physiol Scand*, **183**(2), 181-90.
- Dupont, G., McCall, A., Prieur, F., Millet, G. P. and Berthoin, S. (2010). Faster oxygen uptake kinetics during recovery is related to better repeated sprinting ability. *Eur J Appl Physiol*, **110**(3), 627-34.
- Edge, J., Hill-Haas, S., Goodman, C. and Bishop, D. (2006). Effects of resistance training on H⁺ regulation, buffer capacity, and repeated sprints. *Med Sci Sports Exerc*, **38**(11), 2004-11.
- Edwards, R. H., Hill, D. K., Jones, D. A. and Merton, P. A. (1977). Fatigue of long duration in human skeletal muscle after exercise. *J Physiol*, **272**(3), 769-78.
- Eklblom, B. (1986). Applied physiology of soccer. *Sports Med*, **3**(1), 50-60.
- Enoka, R. M. and Duchateau, J. (2008). Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function. *J Physiol*, **586**(1), 11-23.
- Faude, O., Kellmann, M., Ammann, T., Schnitker, R. and Meyer, T. (2011). Seasonal changes in stress indicators in high level football. *Int J Sports Med*, **32**(4), 259-65.
- Fitts, R. H. (1994). Cellular mechanisms of muscle fatigue. *Physiol Rev*, **74**(1), 49-94.
- Fitzsimons, M., Dawson, B., Ward, D. and Wilkinson, A. (1993). Cycling and running tests of repeated sprint ability. *Aus J Sci Med Sport*, **25**(4), 82-87.
- Gaitanos, G. C., Williams, C., Boobis, L. H. and Brooks, S. (1993). Human muscle metabolism during intermittent maximal exercise. *J Appl Physiol*, **75**(2), 712-9.
- Gandevia, S. C. (2001). Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev*, **81**(4), 1725-89.
- Girard, O., Bishop, D. J. and Racinais, S. (2013). Neuromuscular adjustments of the quadriceps muscle after repeated cycling sprints. *PLoS One*, **8**(5), e61793.
- Girard, O., Chevalier, R., Leveque, F., Micallef, J. P. and Millet, G. P. (2006). Specific incremental field test for aerobic fitness in tennis. *Br J Sports Med*, **40**(9), 791-6.
- Girard, O., Lattier, G., Maffiuletti, N. A., Micallef, J. P. and Millet, G. P. (2008). Neuromuscular fatigue during a prolonged intermittent exercise: Application to tennis. *J Electromyogr Kinesiol*, **18**(6), 1038-46.
- Girard, O., Mendez-Villanueva, A. and Bishop, D. (2011). Repeated-sprint ability - part I: factors contributing to fatigue. *Sports Med*, **41**(8), 673-94.
- Girard, O. and Millet, G. P. (2009). Neuromuscular fatigue in racquet sports. *Phys Med Rehabil Clin N*

Am, **20**(1), 161-73, ix.

Glaister, M. (2005). Multiple sprint work : physiological responses, mechanisms of fatigue and the influence of aerobic fitness. *Sports Med*, **35**(9), 757-77.

Glaister, M., Howatson, G., Pattison, J. R. and McInnes, G. (2008). The reliability and validity of fatigue measures during multiple-sprint work: an issue revisited. *J Strength Cond Res*, **22**(5), 1597-601.

Greenhaff, P. L., Bodin, K., Soderlund, K. and Hultman, E. (1994). Effect of oral creatine supplementation on skeletal muscle phosphocreatine resynthesis. *Am J Physiol*, **266**(5 Pt 1), E725-30.

Helgerud, J., Engen, L. C., Wisloff, U. and Hoff, J. (2001). Aerobic endurance training improves soccer performance. *Med Sci Sports Exerc*, **33**(11), 1925-31.

Hoffman, J. R., Maresh, C. M., Armstrong, L. E., Gabaree, C. L., Bergeron, M. F., Kenefick, R. W., Castellani, J. W., Ahlquist, L. E. and Ward, A. (1994). Effects of hydration state on plasma testosterone, cortisol and catecholamine concentrations before and during mild exercise at elevated temperature. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, **69**(4), 294-300.

Hogan, M. C., Richardson, R. S. and Haseler, L. J. (1999). Human muscle performance and PCr hydrolysis with varied inspired oxygen fractions: a ³¹P-MRS study. *J Appl Physiol*, **86**(4), 1367-73.

Iaia, F. M., Rampinini, E. and Bangsbo, J. (2009). High-intensity training in football. *Int J Sports Physiol Perform*, **4**(3), 291-306.

Iguchi, M., Baldwin, K., Boeyink, C., Engle, C., Kehoe, M., Ganju, A., Messaros, A. J. and Shields, R. K. (2008). Low frequency fatigue in human quadriceps is fatigue dependent and not task dependent. *J Electromyogr Kinesiol*, **18**(2), 308-316.

Iguchi, M. and Shields, R. K. (2010). Quadriceps low-frequency fatigue and muscle pain are contraction-type-dependent. *Muscle Nerve*, **42**(2), 230-238.

Impellizzeri, F. M., Marcora, S. M., Castagna, C., Reilly, T., Sassi, A., Iaia, F. M. and Rampinini, E. (2006). Physiological and performance effects of generic versus specific aerobic training in soccer players. *Int J Sports Med*, **27**(6), 483-92.

Impellizzeri, F. M., Rampinini, E., Castagna, C., Bishop, D., Ferrari Bravo, D., Tibaudi, A. and Wisloff, U. (2008). Validity of a repeated-sprint test for football. *Int J Sports Med*, **29**(11), 899-905.

Ispirlidis, I., Fatouros, I. G., Jamurtas, A. Z., Nikolaidis, M. G., Michailidis, I., Douroudos, I., Margonis, K., Chatzinikolaou, A., Kalistratos, E., Katrabasas, I., Alexiou, V. and Taxildaris, K. (2008). Time-course of changes in inflammatory and performance responses following a soccer game. *Clin J Sport Med*, **18**(5), 423-31.

Jones, D. A. (1996). High-and low-frequency fatigue revisited. *Acta Physiol Scand*, **156**(3), 265-70.

- Jones, D. A., Newham, D. J. and Torgan, C. (1989). Mechanical influences on long-lasting human muscle fatigue and delayed-onset pain. *J Physiol*, **412**, 415-427.
- Juel, C., Pilegaard, H., Nielsen, J. J. and Bangsbo, J. (2000). Interstitial K(+) in human skeletal muscle during and after dynamic graded exercise determined by microdialysis. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, **278**(2), R400-6.
- Krustrup, P., Mohr, M., Amstrup, T., Rysgaard, T., Johansen, J., Steensberg, A., Pedersen, P. K. and Bangsbo, J. (2003). The Yo-Yo Intermittent Recovery Test: physiological response, reliability, and validity. *Med Sci Sports Exerc*, **35**(4), 697-705.
- Krustrup, P., Mohr, M., Nybo, L., Jensen, J. M., Nielsen, J. J. and Bangsbo, J. (2006a). The Yo-Yo IR2 test: physiological response, reliability, and application to elite soccer. *Med Sci Sports Exerc*, **38**(9), 1666-73.
- Krustrup, P., Mohr, M., Steensberg, A., Bencke, J., Kjaer, M. and Bangsbo, J. (2006b). Muscle and blood metabolites during a soccer game: implications for sprint performance. *Med Sci Sports Exerc*, **38**(6), 1165-74.
- Marcora, S., Bosio, A. and de Morree, H. M. (2008). Locomotor muscle fatigue increases cardiorespiratory responses and reduces performance during intense cycling exercise independently from metabolic stress. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, **294**(3), R874-83.
- Martin, V., Kerherve, H., Messonnier, L. A., Banfi, J. C., Geysant, A., Bonnefoy, R., Feasson, L. and Millet, G. Y. (2010). Central and peripheral contributions to neuromuscular fatigue induced by a 24-h treadmill run. *J Appl Physiol*, **108**(5), 1224-33.
- Martin, V., Millet, G. Y., Lattier, G. and Perrod, L. (2005). Why does knee extensor muscles torque decrease after eccentric-type exercise? *J Sports Med Phys Fitness*, **45**(2), 143-51.
- Martin, V., Millet, G. Y., Martin, A., Deley, G. and Lattier, G. (2004). Assessment of low-frequency fatigue with two methods of electrical stimulation. *J Appl Physiol*, **97**(5), 1923-9.
- McGawley, K. and Bishop, D. (2008). Anaerobic and aerobic contribution to two, 5 x 6-s repeated-sprint bouts. *Coach Sport Sci J*, **3**, 52.
- McLean, B. D., Petrucelli, C. and Coyle, E. F. (2012). Maximal power output and perceptual fatigue responses during a Division I female collegiate soccer season. *J Strength Cond Res*, **26**(12), 3189-96.
- Meeusen, R., Watson, P., Hasegawa, H., Roelands, B. and Piacentini, M. F. (2006). Central fatigue: the serotonin hypothesis and beyond. *Sports Med*, **36**(10), 881-909.
- Mendez-Villaneuva, A., Hamer, P. and Bishop, D. (2007). Physical fitness and performance. Fatigue responses during repeated sprints matched for initial mechanical output. *Med Sci Sports Exerc*, **39**(12),

2219-25.

Mendez-Villanueva, A., Hamer, P. and Bishop, D. (2008a). Fatigue in repeated-sprint exercise is related to muscle power factors and reduced neuromuscular activity. *Eur J Appl Physiol*.

Mendez-Villanueva, A., Hamer, P. and Bishop, D. (2008b). Fatigue in repeated-sprint exercise is related to muscle power factors and reduced neuromuscular activity. *Eur J Appl Physiol*, **103**(4), 411-9.

Millet, G. Y. and Lepers, R. (2004). Alterations of neuromuscular function after prolonged running, cycling and skiing exercises. *Sports Med*, **34**(2), 105-16.

Millet, G. Y., Martin, V., Lattier, G. and Ballay, Y. (2003). Mechanisms contributing to knee extensor strength loss after prolonged running exercise. *J Appl Physiol*, **94**(1), 193-8.

Mohr, M., Krstrup, P. and Bangsbo, J. (2003). Match performance of high-standard soccer players with special reference to development of fatigue. *J Sports Sci*, **21**(7), 519-28.

Mohr, M., Krstrup, P. and Bangsbo, J. (2005). Fatigue in soccer: a brief review. *J Sports Sci*, **23**(6), 593-9.

Mohr, M., Mujika, I., Santisteban, J., Randers, M. B., Bischoff, R., Solano, R., Hewitt, A., Zubilaga, A., Peltola, E. and Krstrup, P. (2010). Examination of fatigue development in elite soccer in a hot environment: a multi-experimental approach. *Scand J Med Sci Sports*, **20**(Suppl. 3), 125-32.

Morton, J. P., Atkinson, G., MacLaren, D. P., Cable, N. T., Gilbert, G., Broome, C., McArdle, A. and Drust, B. (2005). Reliability of maximal muscle force and voluntary activation as markers of exercise-induced muscle damage. *Eur J Appl Physiol*, **94**(5-6), 541-8.

Novacheck, T. F. (1998). The biomechanics of running. *Gait and Posture*, **7**, 77-95.

Nybo, L. and Nielsen, B. (2001). Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans. *J Appl Physiol*, **91**(3), 1055-60.

Perrey, S., Racinais, S., Saimouaa, K. and Girard, O. (2010). Neural and muscular adjustments following repeated running sprints. *Eur J Appl Physiol*, **109**(6), 1027-36.

Place, N., Maffiuletti, N. A., Martin, A. and Lepers, R. (2007). Assessment of the reliability of central and peripheral fatigue after sustained maximal voluntary contraction of the quadriceps muscle. *Muscle Nerve*, **35**(4), 486-95.

Racinais, S., Bishop, D., Denis, R., Lattier, G., Mendez-Villanueva, A. and Perrey, S. (2007). Muscle deoxygenation and neural drive to the muscle during repeated sprint cycling. *Med Sci Sports Exerc*, **39**(2), 268-74.

Racinais, S., Connes, P., Bishop, D., Blanc, S. and Hue, O. (2005). Morning versus evening power

output and repeated-sprint ability. *Chronobiol Int*, **22**(6), 1029-39.

Racinais, S., Perrey, S., Denis, R. and Bishop, D. (2010). Maximal power, but not fatigability, is greater during repeated sprints performed in the afternoon. *Chronobiol Int*, **27**(4), 855-64.

Rampinini, E., Bishop, D., Marcora, S. M., Ferrari Bravo, D., Sassi, R. and Impellizzeri, F. M. (2007a). Validity of simple field tests as indicators of match-related physical performance in top-level professional soccer players. *Int J Sports Med*, **28**(3), 228-35.

Rampinini, E., Bosio, A., Ferraresi, I., Petruolo, A., Morelli, A. and Sassi, A. (2011). Match-related fatigue in soccer players. *Med Sci Sports Exerc*, **43**(11), 2161-70.

Rampinini, E., Coutts, A. J., Castagna, C., Sassi, R. and Impellizzeri, F. M. (2007b). Variation in top level soccer match performance. *Int J Sports Med*, **28**(12), 1018-24.

Rampinini, E., Impellizzeri, F. M., Castagna, C., Azzalin, A., Ferrari Bravo, D. and Wisloff, U. (2008). Effect of match-related fatigue on short-passing ability in young soccer players. *Med Sci Sports Exerc*, **40**(5), 934-42.

Rampinini, E., Sassi, A., Morelli, A., Mazzoni, S., Fanchini, M. and Coutts, A. J. (2009). Repeated-sprint ability in professional and amateur soccer players. *Appl Physiol Nutr Metab*, **34**(6), 1048-54.

Ratel, S., Williams, C. A., Oliver, J. and Armstrong, N. (2006). Effects of age and recovery duration on performance during multiple treadmill sprints. *Int J Sports Med*, **27**(1), 1-8.

Reilly, T. (1997). Energetics of high-intensity exercise (soccer) with particular reference to fatigue. *J Sports Sci*, **15**(3), 257-63.

Reilly, T. and Thomas, V. (1977). Effects of a programme of pre-season training on the fitness of soccer players. *J Sports Med Phys Fitness*, **17**(4), 401-12.

Ross, A., Leveritt, M. and Riek, S. (2001). Neural influences on sprint running: training adaptations and acute responses. *Sports Med*, **31**(6), 409-25.

Rostgaard, T., Iaia, F. M., Simonsen, D. S. and Bangsbo, J. (2008). A test to evaluate the physical impact on technical performance in soccer. *J Strength Cond Res*, **22**(1), 283-92.

Sahlin, K. and Ren, J. M. (1989). Relationship of contraction capacity to metabolic changes during recovery from a fatiguing contraction. *J Appl Physiol*, **67**(2), 648-54.

Saltin, B. (1973). Metabolic fundamentals in exercise. *Med Sci Sports*, **5**(3), 137-46.

Schmikli, S. L., de Vries, W. R., Brink, M. S. and Backx, F. J. (2012). Monitoring performance, pituitary-adrenal hormones and mood profiles: how to diagnose non-functional over-reaching in male elite junior soccer players. *Br J Sports Med*, **46**(14), 1019-23.

- Shrout, P. E. and Fleiss, J. (1979). Intraclass correlations: uses in assessing rater reliability. *Psychol Bull*, **86**, 420-428.
- Shushakov, V., Stubbe, C., Peuckert, A., Endeward, V. and Maassen, N. (2007). The relationships between plasma potassium, muscle excitability and fatigue during voluntary exercise in humans. *Exp Physiol*, **92**(4), 705-15.
- Sinoway, L. I., Hill, J. M., Pickar, J. G. and Kaufman, M. P. (1993). Effects of contraction and lactic acid on the discharge of group III muscle afferents in cats. *J Neurophysiol*, **69**(4), 1053-9.
- Sjogaard, G., Savard, G. and Juel, C. (1988). Muscle blood flow during isometric activity and its relation to muscle fatigue. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, **57**(3), 327-35.
- Spencer, M., Bishop, D., Dawson, B., Goodman, C. and Duffield, R. (2006). Metabolism and performance in repeated cycle sprints: active versus passive recovery. *Med Sci Sports Exerc*, **38**(8), 1492-9.
- Spencer, M., Rechichi, C., Lawrence, S., Dawson, B., Bishop, D. and Goodman, C. (2005). Time-motion analysis of elite field hockey during several games in succession: a tournament scenario. *J Sci Med Sport*, **8**(4), 382-91.
- Taylor, J. L. and Gandevia, S. C. (2008). A comparison of central aspects of fatigue in submaximal and maximal voluntary contractions. *J Appl Physiol*, **104**(2), 542-50.
- Thomas, J. R. and Nelson, J. K. (2005). *Research Methods in Physical Activity* (Fifth ed.). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Thorlund, J. B., Aagaard, P. and Madsen, K. (2009). Rapid muscle force capacity changes after soccer match play. *Int J Sports Med*, **30**(4), 273-8.
- Todd, G., Gorman, R. B. and Gandevia, S. C. (2004). Measurement and reproducibility of strength and voluntary activation of lower-limb muscles. *Muscle Nerve*, **29**(6), 834-42.
- Tomazin, K., Morin, J. B., Strojnik, V., Podpecan, A. and Millet, G. Y. (2012). Fatigue after short (100-m), medium (200-m) and long (400-m) treadmill sprints. *Eur J Appl Physiol*, **112**, 1027-1036.
- Verges, S., Maffiuletti, N. A., Kerhervé, H., Decorte, N., Wuyam, B. and Millet, G. Y. (2009). Comparison of electrical and magnetic stimulations to assess quadriceps muscle function. *J Appl Physiol*, **106**(2), 701-10.
- Vincent, W. J. (1995). *Statistics in kinesiology*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Warren, G. L., Lowe, D. A. and Armstrong, R. B. (1999). Measurement tools used in the study of eccentric contraction-induced injury. *Sports Med*, **27**(1), 43-59.

Westerblad, H., Allen, D. G. and Lannergren, J. (2002). Muscle fatigue: lactic acid or inorganic phosphate the major cause? *News Physiol Sci*, **17**, 17-21.