

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

SCUOLA DI SCIENZE MEDICHE E FARMACEUTICHE

DIPARTIMENTO DI MEDICINA SPERIMENTALE (DIMES)

Corso di Laurea Magistrale in Scienze e Tecniche dello Sport



**Effetti acuti dell'immaginazione motoria sulla
biomeccanica della corsa su treadmill**

Relatore: *Prof.ssa Ambra Bisio*

Correlatori: *Dott. Marco Panascì*

Dott. Ricardo Muller Bottura

Candidato: *Andina Giacomo*

Anno accademico 2025-2026

RINGRAZIAMENTI

Non è facile fare una sintesi dopo due anni così densi e pieni di cambiamenti, di gioie, di fatiche e di sogni. Genova è stata per me la prima esperienza di vita fuori casa, di adultità, uno step importante che mi ha permesso di diventare sempre più uomo.

Parto dal ringraziare la professoressa Bisio e il dottor Panasci per l'opportunità datami di poter seguire questo progetto, per avermi accompagnato nella scoperta della ricerca nell'ambito delle scienze motorie, per il supporto e i consigli di questi mesi. Ringrazio il dottor Bottura per le numerose ore passate insieme, per i confronti e le domande che mi hanno aiutato a crescere, per la sua disponibilità e allegria che hanno contraddistinto tutti i mesi di sperimentazione e raccolta dati. Vi ringrazio, inoltre, per la piena fiducia e per la riconoscenza del lavoro svolto, che sempre mi avete mostrato.

Grazie mamma e grazie papà per tutto! Ci siete sempre stati nei momenti di scelta, anche quando non sempre eravate d'accordo con la mia idea, in ogni gioia e fatica. Grazie per tutte le sveglie alle 6 del mattino per portarmi in stazione, per tutti i cambi auto del giovedì (solo tu mamma sai quanti km ti ho fatto macinare); alla fine è da gesti concreti e piccoli che passa l'amore. Ma soprattutto grazie perché nella vita si fanno scelte grandi solo se ci si sente sostenuti e, anche quando tremano le gambe, c'è bisogno di una roccia a cui appoggiarsi e voi siete stati quella roccia. Mi avete incoraggiato in questa nuova esperienza fuori casa, lasciandomi libero di andare, sperimentare ed essendo sempre pronti a riaccogliermi.

Grazie Nene e Matte per il tifo che avete sempre fatto per me, per come mi siete stati vicini in ogni passaggio di questi due anni. Grazie Nene per tutte le cene alle 10 di sera, in cui mi hai tenuto compagnia e grazie Teo per tutti i messaggi pre e post esame che sempre mi hanno accompagnato. Non sempre riesco a dimostrare la gratitudine che ho verso di voi, però vi assicuro che nel mio cuore ce n'è tanta.

Grazie Chiaretta che mi sopporti e supporti, visto che a casa non bastava ti è toccato farlo anche a Genova; in questi due anni hai accolto sfoghi, fatiche, gioie, canti, piatti e tanto tanto altro, è stato bello condividere la casa in un luogo diverso da casa. Grazie a te e Sari che mi avete fatto sempre sentire parte di voi, via Donghi è diventata la nostra dependance. Grazie per il clima di festa, per la sincerità, per le risate (Edoardo ma cosa ci fai con quella tunica, hai 150 anni), per esservi sottoposte alle mie ricette, non sempre ben riuscite. Mi mancherà condividere la semplice quotidianità, le serate nel lettone e sono sicuro che a voi mancheranno i miei concerti privati.

Grazie ai familiari e agli amici, che mi sono stati accanto e che oggi sono qui a gioire con me, ho sempre percepito il vostro sostegno tra università e Orange.

Grazie nonna Genia per come hai sempre valorizzato il mio studio e per l'allegria, perché ti ricordi sempre di tutti i miei impegni e, nel silenzio, non ti sei mai persa

un aggiornamento su esami o risultati sportivi. Grazie per le tue domande che mi portano a condividere cosa conta davvero in questa meravigliosa vita e per i tuoi racconti che mi ricordano quanto io sia fortunato. So che vorremo sempre avere più tempo, però sono grato per quanto riusciamo a dividerne.

Grazie ai miei compagni che hanno reso più leggeri questi due anni, per chi rimarrà e per chi è stato una bella comparsa di questa mia vita, sono grato per aver incontrato ciascuno di loro.

Grazie a voi, amici, che siete qui oggi; grazie a chi c'è da sempre e grazie a chi, proprio in questi due anni, è diventato importante per me. Se la vita è un viaggio meraviglioso, serve davvero avere i compagni giusti e posso dire che davanti a me ne ho di validi, per me i migliori. Grazie perché ogni vostra caratteristica mi mostra una sfumatura del volto di Dio e del Suo modo di amarmi.

Grazie Trenitalia, se non fosse stato per la media di sei ore a settimana passate con te, non avrei mai letto tutti questi libri; mi sento più ricco e più pieno.

Grazie Chiara, è difficile trovare delle parole che esprimano quanto mi si muove dentro nel vederti e pensarti. Sei roccia e sostegno, hai visto il bello e il brutto di chi sono e non hai mai smesso di starmi accanto. Grazie perché in tutti questi miei giri, esperienze e nella distanza, non hai mai smesso di incoraggiarmi, sostenermi e valorizzarmi. Grazie per come mi fai alzare lo sguardo e per come mi insegni a guardare alla vita, è un dono grande averti accanto.

Infine, grazie a te Padre che sei l'artista dietro a questa meravigliosa tela. Grazie per avermi desiderato e custodito, ti affido tutte queste persone che mi hai messo accanto perché possano portare ancora più frutto. Grazie per questo traguardo, ogni cosa fatta con te ha più gusto.

“In verità vi dico: ogni volta che avete fatto queste cose a uno solo di questi miei fratelli più piccoli, l'avete fatto a me.”

Matteo 25, 40

ABSTRACT

L'immaginazione motoria (*Motor Imagery*, MI) è ampiamente utilizzata in ambito sportivo per migliorare il controllo motorio e l'efficacia del gesto tecnico. Tuttavia, gli studi che ne analizzano gli effetti sull'economia di corsa risultano ancora limitati. Il presente studio si propone di indagare gli effetti acuti della MI sui parametri biomeccanici durante una prova di corsa a esaurimento.

Sono stati reclutati, su base volontaria, 26 studenti universitari fisicamente attivi, assegnati in modo randomizzato a un gruppo sperimentale (MI group) e a un gruppo di controllo (CONTR). Lo studio è stato condotto secondo un disegno sperimentale in singolo cieco.

In una prima sessione, tutti i partecipanti hanno eseguito un test cardiopolmonare incrementale (CPET) su tapis roulant, finalizzato all'individuazione della velocità corrispondente alla seconda soglia ventilatoria (v_{VT2}). Ventiquattro ore dopo, ciascun soggetto ha svolto una prova di corsa a esaurimento (*Time to Exhaustion*, TTE) alla velocità v_{VT2} . Prima del TTE, il gruppo MI ha eseguito una sessione di immaginazione motoria guidata, focalizzata sui principali parametri biomeccanici della corsa, con particolare attenzione all'oscillazione verticale e alla lunghezza del passo; il gruppo CONTR, invece, ha letto un articolo scientifico riguardante l'influenza della biomeccanica sull'economia di corsa. In entrambe le prove, i parametri biomeccanici sono stati registrati mediante Garmin Dynamic Pod.

Per i dati raccolti nei due test è stata eseguita un'analisi lineare multivariata (GLM), considerando cadenza, tempo di contatto con il suolo, lunghezza del passo, oscillazione verticale e rapporto verticale come variabili dipendenti, e la velocità come covariata (solo per il TTE). Tale analisi non ha evidenziato differenze statisticamente significative tra i due gruppi. Successivamente, per la prova TTE, è stata condotta un'analisi univariata (ANOVA), che ha mostrato una differenza statisticamente significativa nel rapporto verticale ($p = 0.030$), con valori inferiori nel gruppo MI ($7,32 \pm 1,18$) rispetto al gruppo CONTR ($8,68 \pm 1,77$). Infine, l'analisi di regressione gerarchica ha evidenziato che l'appartenenza al gruppo spiega il 18% della variabilità del rapporto verticale ($\Delta R^2 = 0.184$, $p = 0.029$), mentre il contributo della velocità non è risultato statisticamente significativo ($p = 0.820$).

I risultati dello studio indicano che una singola sessione di immaginazione motoria è in grado di determinare un miglioramento del rapporto verticale durante una prova di corsa a esaurimento. Pertanto, la MI può rappresentare un valido supporto alla pratica fisica, contribuendo al miglioramento della tecnica di corsa.

Indice

1. INTRODUZIONE	1
1.1 La Motor Imagery (MI)	2
1.1.1 Tipologie di immaginazione motoria	5
1.1.2 Metodo PETTLEP	8
1.1.3 MI e sport	12
1.2 La corsa e le sue fasi	17
1.2.1 Gli aspetti biomeccanici e l'economia di corsa	18
1.3 La Motor Imagery nella corsa	22
1.4 Obiettivo dello studio	23
2. CONTRIBUTO SPERIMENTALE	24
2.1 MATERIALI E METODI	25
2.1.1 Partecipanti	25
2.1.2 Protocollo sperimentale	25
2.1.3 Strumentazioni	29
2.1.4 Scale valutative (questionario MIQ-R e scala RPE)	30
2.1.5 Analisi dati	31
3. RISULTATI	33
4. DISCUSSIONE	36
4.1 Possibili studi futuri	40
4.2 Conclusioni	40
5. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	41

1. INTRODUZIONE

1.1 La Motor Imagery (MI)

L'immaginazione motoria, nota anche con il termine inglese *Motor Imagery*, consiste in un processo cognitivo complesso attraverso il quale un individuo è in grado di rappresentare mentalmente un movimento, senza però tradurlo in un'esecuzione fisica concreta. In altre parole, si tratta della capacità di "simulare" internamente un'azione motoria mantenendo il corpo in uno stato di immobilità. Questo fenomeno implica l'attivazione di molte delle stesse strutture cerebrali coinvolte nell'esecuzione reale del movimento, suggerendo un'intima connessione tra immaginazione e azione.

Un contributo fondamentale, nonché uno tra i primi, fu portato dagli studi del neurologo e neurofisiologo Marc Jeannerod (1935-2011), considerato uno dei massimi esperti nello studio delle neuroscienze cognitive applicate al movimento. Nel 1995 in un suo articolo pubblicato sulla rivista *Neuropsychologia*, si concentrò principalmente sul concetto di simulazione, già citato prima, definendo l'immaginazione mentale come una vera e propria forma di simulazione statica del movimento che il soggetto desidera riprodurre. Sulla base di questo concetto Lotze & Halsband (2006), sulla rivista *Journal of Physiology*, approfondiscono dicendo: "l'immaginazione motoria (MI) rappresenta il risultato dell'accesso cosciente al contenuto dell'intenzione di un movimento, che di solito avviene inconsciamente durante la preparazione del movimento stesso" (p.386).

Per capire meglio questa affermazione è necessario individuare e approfondire le aree di attivazione cerebrale adibite al movimento, confrontandole con quelle legate all'immaginazione motoria. Come precedentemente detto, molte delle strutture cerebrali attive durante la reale esecuzione del movimento, risultano attivarsi anche durante la pratica di immaginazione. Grazie all'utilizzo della tomografia a emissione di positroni (PET) e della risonanza magnetica funzionale (fMRI) – due tecniche di neuroimmagine – è stato possibile confrontare le diverse attività corticali, seppur con dei limiti causati dalla componente strutturale della fMRI che permette di eseguire solamente movimenti distali fini, o movimenti complessi ma ad ampiezza ridotta (Guillot et al., 2014). Prima di andare ad affrontare i diversi studi, risulta necessario definire quali sono le aree cerebrali impiegate nella pianificazione, esecuzione e controllo di un movimento volontario:

- l'area supplementare motoria (SMA): coinvolta nella programmazione interna di movimenti, soprattutto quelli complessi e sequenziali, è importante per la coordinazione tra le due mani;
- la corteccia premotoria (PMC): seleziona il movimento in base stimoli esterni, integrando informazioni sensoriali;
- la corteccia motoria primaria (cM1): responsabile dell'esecuzione del movimento, invia comandi tramite i motoneuroni;
- il lobo parietale inferiore e superiore (IPL e SPL): guidano il movimento, si occupano di orientamento spaziale, integrazione delle informazioni visive e propriocettive, movimenti finalizzati;
- i gangli della base: regolano l'inizio del movimento, selezionano e inibiscono i programmi motori in modo che i movimenti volontari possano essere eseguiti fluidamente;
- il cervelletto: fondamentale per il controllo fine e la correzione degli errori, fornisce un *feedback* tra l'azione pianificata e quella eseguita, coordina le sequenze di movimenti complessi.

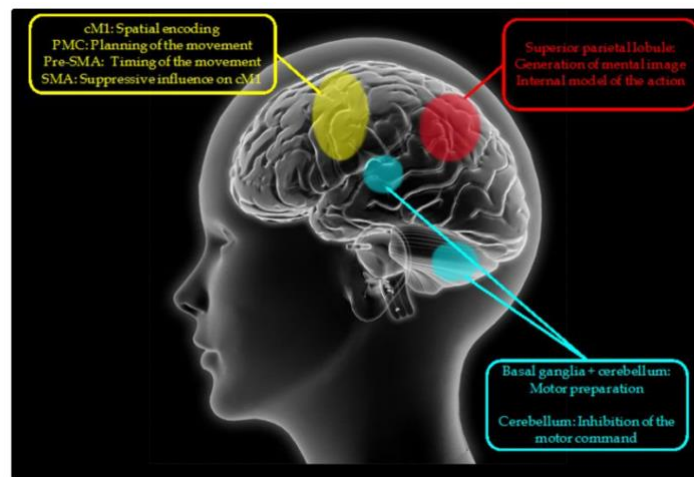


Figura 1. Regioni cerebrali coinvolte nelle funzioni motorie con i rispettivi possibili ruoli (fonte: Guillot et al., 2014)

Le principali ricerche di neuroimmagine si concentrano sul confronto delle attività corticali e sottocorticali durante l'esecuzione, l'immaginazione e l'osservazione, e si basano su esercizi di *finger tapping*, movimenti della lingua, di mani e piedi. Hanakawa et al. (2008) arrivarono alla conclusione che la

corteccia motoria primaria non ha un'attivazione così elevata durante la MI e, pertanto, la MI riguarda le aree più simili alla preparazione del movimento piuttosto che all'esecuzione. In aggiunta, Miller et al. (2010), sono andati ad analizzare, grazie all'utilizzo dell'elettrocorticografia (ECoG), i potenziali di superficie corticale durante l'esecuzione, la MI e un feedback visivo, giungendo alla conclusione che il potenziale ha una distribuzione spaziale che non si equivale tra diversi movimenti ma, invece, risulta sovrapponibile tra esecuzione e immaginazione dello stesso movimento. Guillot et al. (2014), sono riusciti a convogliare in un'unica meta-analisi i diversi studi svolti per giungere ad una maggiore specificità di attivazione corticale e sottocorticale. La totalità di questi ha evidenziato un reclutamento delle aree motorie secondarie: corteccia premotoria, SMA e pre-SMA; del cervelletto, dei gangli della base, dei lobi parietali, mentre non tutti confermano l'attivazione della corteccia motoria primaria (cM1), poiché formata da due componenti: una anteriore, legata alle funzioni esecutive e quindi meno attiva nella MI, e una posteriore, adibita a funzioni cognitive e quindi attiva durante la MI. Grazie ad una sintesi quantitativa di oltre mille esperimenti divisi tra 303 di immaginazione, 595 di osservazione e 142 di esecuzione, Hardwick et al. (2018) hanno confermato i risultati precedenti concludendo che la MI si caratterizza per l'attivazione delle aree legate a funzioni esecutive, all'inibizione del movimento e al controllo del movimento, grazie all'attivazione delle aree sottocorticali, mentre l'esecuzione motoria recluta l'intera rete sensomotoria, inclusa la corteccia motoria primaria. L'osservazione dell'azione attiva invece principalmente aree corticali visive e premotorie, senza coinvolgimento sottocorticale.

Mettendo insieme i vari studi, si può affermare che: le aree cerebrali attive durante l'immaginazione sono per gran parte sovrapponibili a quelle attive durante l'esecuzione stessa del movimento.

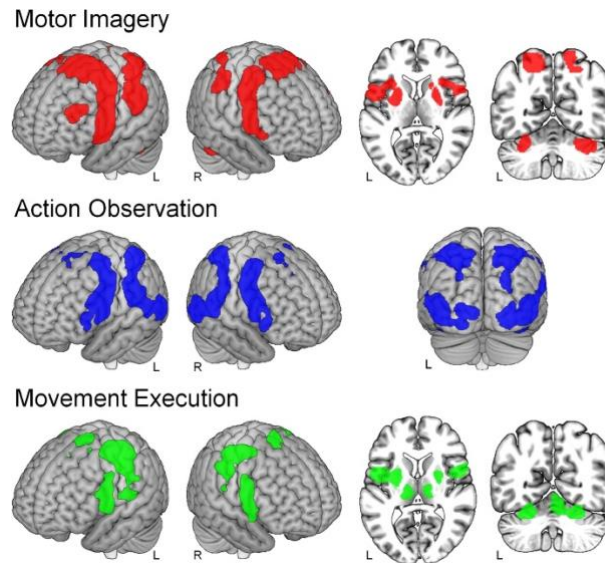


Figura 2. Aree di attivazione corticale nelle 3 differenti condizioni, la *action observation* non presenta la sezione trasversa poiché non vi è attivazione sottocorticale (fonte. Hardwick et al., 2018).

I risultati ottenuti spiegano il perché della correlazione temporale tra il movimento immaginato e quello realizzato: più il movimento è semplice, automatizzato e ciclico, più vi sarà isocronia tra l'azione reale e quella immaginata, più il compito si fa complesso, sia dal punto di vista fisico che attentivo, e più il tempo si dilata (Lotze & Halsband, 2006). Inoltre, anche l'esperienza dell'atleta risulta determinante, si è visto che atleti più esperti hanno maggiore capacità rappresentativa ed equivalenza temporale (Guillot & Collet, 2005b). Infine, è fondamentale ricordare che la MI non funziona come potenziamento delle abilità ma, permette di andare a rappresentare solo dei compiti motori appresi e consolidati dal soggetto. Possiamo, quindi, definire la pratica mentale come una variabile dipendente dal corpo stesso, proprio perché risulta difficile andare ad immaginare chiaramente un compito motorio che non si sa eseguire (Olsson & Nyberg, 2010).

1.1.1 Tipologie di immaginazione motoria

Dopo aver visto la definizione della MI e aver analizzato i meccanismi neurologici, risulta fondamentale entrare nello specifico delle tecniche di immaginazione. Classicamente l'immaginazione motoria, a livello sportivo, è divisa in due modalità principali, le quali differiscono per punto di osservazione ed esecuzione dell'azione richiesta:

- Immaginazione visiva (*visual motor imagery*): è la rappresentazione mentale del movimento in forma visiva e può svilupparsi in prima o terza persona. Coinvolge maggiormente le aree occipitali e parietali, nonché il sistema dei neuroni specchio, soprattutto nella visualizzazione in terza persona (Guillot & Collet, 2005a; Guillot et al., 2014). Dal punto di vista sportivo è maggiormente utilizzata per l'apprendimento e la correzione di un gesto motorio.
- Immaginazione cinestetica (*kinesthetic motor imagery*): è, invece, la rappresentazione mentale del movimento in termini somatosensoriali; nello specifico, si basa sulla percezione della tensione muscolare, della respirazione, della frequenza cardiaca, della forza, velocità e ampiezza del movimento. Coinvolge maggiormente l'attivazione della cM1, della SMA e del cervelletto (Kraeutner et al., 2014). Dal punto di vista sportivo è considerata quella più efficiente a livello di *transfer* diretto, permette all'atleta di concentrarsi sul controllo e sul miglioramento a livello coordinativo del gesto immaginato (Fournier et al., 2008).

La letteratura scientifica citata precedentemente mette in risalto come l'immaginazione cinestetica sia quella maggiormente efficace, anche se molto dipendente dall'esperienza dell'atleta, dalla quantità di allenamenti e dalla sua capacità immaginativa. In contrapposizione, la MI di tipo visivo risulterà più adatta per quegli atleti con meno esperienza e meno abilità sportive. In conclusione, un'immaginazione personalizzata al livello e alle capacità del soggetto sarà molto efficace, con la possibilità di portare a dei miglioramenti consolidati se abbinata all'allenamento reale (Cumming & Ramsey, 2009).

Poiché non tutti i soggetti hanno la stessa capacità immaginativa, la MI non ha la medesima efficienza. L'immaginazione, per essere davvero utile, deve rispettare due caratteristiche fondamentali: la vividezza (*vividness*) e la controllabilità (*controllability*). La *vividness* è definita in letteratura come la capacità di creare delle immagini mentali chiare, dettagliate e realistiche; questo risulta possibile grazie ai diversi canali sensoriali, uditivo, olfattivo, emotivo e cinestetico, che si attivano contemporaneamente. Tanto maggiore è l'attivazione di questi canali, tanto più l'immagine risulterà efficace nella nostra rappresentazione. Le aree motorie

saranno più attive, anche a livello cerebrale, portando ad un'effettiva somiglianza con il movimento reale. Una maggiore vividezza porta ad un miglior apprendimento, con un *transfer* diretto alla performance reale. La *controllability*, invece, è la capacità di manipolare volontariamente l'immagine mentale: il soggetto diventa padrone della rappresentazione, senza lasciare che fluisca in maniera passiva. Questo permette all'atleta di variare spazi e tempi, di agire sulla velocità di esecuzione del gesto immaginato, di correggere eventuali errori e di scomporre il gesto in parti specifiche, selezionando quali attenzionare maggiormente. Inoltre, rende l'atleta consapevole della sua capacità attentiva; pertanto, questa caratteristica risulta fondamentale per portare dei miglioramenti dal punto di vista tecnico ed esecutivo. In sintesi, possiamo affermare che l'efficacia dell'*Imagery* dipende dalla sua vividezza, che ne determina il realismo percettivo, e dalla controllabilità, che consente la manipolazione attiva dell'immagine per ottimizzare l'apprendimento motorio (Lingvall et al., 2019). Il miglioramento di queste due abilità può essere favorito dalla presenza di un operatore qualificato (ad es. allenatore, psicologo dello sport, fisioterapista) che, attraverso *feedback* verbali mirati, guida l'atleta nel rafforzare la qualità dell'immaginazione.

Con il fine di valutare queste capacità, si è arrivati alla realizzazione di due strumenti, seppur limitati dall'aspetto soggettivo dell'atleta:

- Vividness of Movement Imagery Questionnaire (VMIQ-2): consiste in 12 *item* che richiedono di immaginare movimenti semplici e quotidiani (ad esempio correre, saltare) da tre prospettive differenti – visiva interna, esterna e cinestetica – attribuendo un punteggio da 1 (immagine molto chiara) a 5 (assenza di immagine) per ogni movimento proposto (Roberts et al., 2008).
- Movement Imagery Questionnaire-Revised Second Version (MIQ-RS): include 4 *item* riguardanti movimenti semplici da immaginare utilizzando sia la modalità visiva sia la modalità cinestesica, valutandoli con un punteggio da 1 (estrema facilità di immaginazione) a 7 (estrema difficoltà) (Gregg et al., 2010).

Per superare i limiti di questi strumenti soggettivi, Madan & Singhal (2013) hanno sviluppato il Test of Ability in Movement Imagery (TAMI), un test oggettivo basato

su 10 domande relative a movimenti progressivamente più complessi, partendo da una posizione di partenza standardizzata (eretta con le braccia lungo i fianchi). Viene proposta una sequenza di movimenti da immaginare, in seguito si chiede al soggetto di mantenere la rappresentazione e scegliere una risposta tra le diverse opzioni, consapevole che solamente una delle soluzioni date è corretta. Questo *test* supera il limite dell'autopercezione, ma rimane comunque incompleto poiché valuta l'immaginazione visiva escludendo qualsiasi aspetto cinestetico.

1.1.2 Metodo PETTLEP

Fino agli anni 2000 l'immaginazione motoria non prevedeva un metodo univoco per guidare gli atleti nella rappresentazione; questa mancanza di chiarezza rendeva faticosi, e spesso vani, i diversi tentativi di erogazione dell'allenamento, a prescindere dal fatto che l'impronta fosse maggiormente visiva o cinestetica. Vent'anni fa Holmes e Collins (2001) pubblicarono un modello – delineato da sette principi: Fisico, Ambiente, Compito, Tempistica, Apprendimento, Emozione, Prospettiva (ovvero PETTLEP) – con il fine di migliorare l'erogazione e l'esito degli interventi di MI. L'obiettivo era quello di rendere l'allenamento immaginativo il più efficace possibile, portando l'attivazione delle aree cerebrali alla massima sovrapposibilità tra movimento eseguito e rappresentato mentalmente.

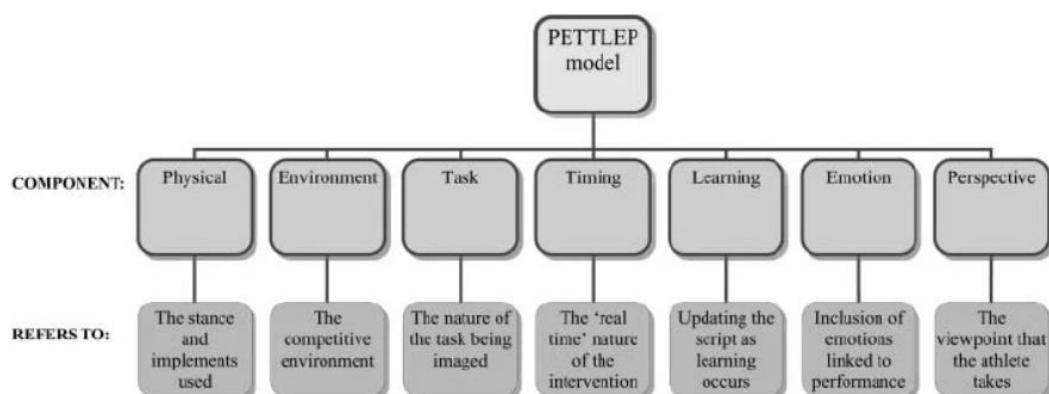


Figura 3. Schema grafico delle componenti del metodo PETTLEP (fonte Wakefield & Smith, 2012)

Questa metodologia, ad oggi, è la più utilizzata per l'erogazione di allenamenti di MI in ambito sportivo; questo poiché i sette principi, basati su aspetti cinestetici e visivi, aiutano a rendere l'immaginazione il più realistica possibile. Per capire meglio l'effettiva efficacia di questo intervento procedo con l'analisi delle

componenti del modello, basandomi sull'articolo pubblicato da Wakefield & Smith (2012) sulla rivista *Journal of Sport Psychology in Action*.

La lettera P (*physical*) rimanda all'esigenza di rendere l'immaginazione il più reale possibile, passando proprio dalla componente fisica. I principali aspetti su cui agisce sono: l'abbigliamento, che deve essere uguale a quando si esegue effettivamente il movimento, e l'utilizzo di attrezzi propri della pratica. In uno studio sul *curl* per bicipiti Wright & Smith (2009) hanno dimostrato che sedersi al macchinario e impugnare le maniglie durante l'immaginazione, permetteva agli atleti di percepire una certa contrazione muscolare; inoltre, loro stessi, riferivano un punteggio più alto nel questionario *post-test*, per valutare l'efficacia dell'*Imagery*, rispetto agli atleti che avevano eseguito una tecnica classica di immaginazione con rilassamento. La lettera E (*environment*) porta l'attenzione al luogo in cui viene svolto l'allenamento mentale, secondo questo modello è importante che l'immaginazione venga svolta in un ambiente che sia il più possibile simile a quello in cui si esegue la partita fisica. Se non è possibile fare ciò, in quanto molto spesso gli studi vengono svolti in laboratorio, allora video, audio e fotografie potrebbero essere utilizzate per assistere l'esperienza dell'immaginazione. La prima T (*task*) si riferisce al compito. Abbiamo già visto precedentemente come l'immaginazione debba essere adattata al livello e alle capacità fisiche dell'atleta; pertanto, il modello richiede che l'attenzione durante la MI sia posta su aspetti che vanno da un contesto generale ad uno più tecnico e specifico, man mano che il soggetto diventa più abile. La seconda T (*timing*) si riferisce alle tempistiche dell'immaginazione che dovrebbero rispettare, il più possibile, il principio di isocronia tra azione eseguita e rappresentazione mentale. Questo porta al risultato che la velocità del gesto immaginato sarà fondamentalmente simile a quella di esecuzione reale. La lettera L (*learning*) è strettamente correlata alla componente *task*, difatti questo principio ritorna sul concetto di apprendimento basato sulle abilità del soggetto. Ancora una volta si porta l'attenzione sull'adattamento della pratica immaginativa alle capacità reali dell'atleta, incentivandone una progressione; se nelle prime fasi viene chiesto di rappresentare mentalmente il compito base, man mano che l'atleta progredisce, anche l'*Imagery* verterà su aspetti tecnici che necessitano di essere perfezionati. Infine, nel progressivo aumento della complessità, Wakefield & Smith (2012),

sottolineano come gli aspetti psicologici quali la fiducia, la confidenza con l'esercizio e la motivazione, giochino un ruolo fondamentale. Ed è proprio sulla sfera psicologica che si fonda la penultima lettera, la E (*emotion*); lo sport, soprattutto a livello agonistico, è accompagnato e sostenuto da una forte componente emotiva. Questo ragionamento ha portato Holmes e Collins a porsi la domanda: "Come può essere considerata realistica una rappresentazione mentale basata sul rilassamento, quando lo sport è fortemente influenzato dalla sfera emotiva?". Per questo non è sorprendente vedere che Wright & Smith (2009) nel loro studio trovarono che l'utilizzo del modello PETTLEP, e in particolare la componente dell'emozione, potesse portare a risultati migliori rispetto una seduta di *Imagery* in cui l'istruzione ricevuta era quella di "rilassarsi". Inoltre, Morone et al. (2022) hanno evidenziato come un'immaginazione positiva, permetta all'atleta di connettersi con le sensazioni piacevoli provante durante la competizione a seguito della riuscita del gesto. Per concludere, l'emozione migliora la *vividness* e aumenta l'attività muscolare, registrata grazie all'elettromiografia, dei muscoli più coinvolti in quell'azione (Wilson et al., 2010). L'ultima lettera, la P (*prospective*), si riferisce alla prospettiva di osservazione dell'esecutore nel momento dell'immaginazione. Come evidenziato nel capitolo relativo ai tipi di immaginazione, la prospettiva può essere interna, in prima persona, o esterna, in terza persona. La scelta si basa sulla tipologia che l'atleta percepisce maggiormente adatta alle sue caratteristiche e che porta all'ottimizzazione dei risultati. Sicuramente la prospettiva esterna risulta essere più adatta per lo scopo di apprendimento; in contrapposizione, quella interna, è considerata più utile per il perfezionamento e il consolidamento di un gesto appreso.

Abbiamo visto come questo modello sia molto completo poiché basato sui diversi elementi che compongono un determinato gesto motorio. Tuttavia, i nuovi studi sono volti a cercare di implementare, e quindi di migliorare, l'allenamento mentale, ritenendo il metodo PETTLEP non completo. A tal proposito Scott et al. (2022), in uno studio pubblicato sulla rivista "Asian Journal of Sport and Exercise Psychology", hanno presentato l'impatto negli ultimi vent'anni del metodo PETTLEP, analizzandone alcuni limiti e proponendo delle alternative di sviluppo. L'attenzione era posta maggiormente alla componente "compito" che spesso viene

accompagnata da uno *script*, letto dall'allenatore, che racconta passo dopo passo, spesso con termini in seconda persona, quello che bisogna immaginare; un approccio sicuramente adatto per i principianti ma che presenta il rischio reale di rafforzare un controllo cognitivo depersonalizzato del movimento. Per ovviare a questo, l'articolo presenta la possibilità di integrare l'osservazione dell'azione (AO), tramite video, alle tecniche immaginative, con lo scopo di migliorare la congruenza temporale e attivare maggiormente le reti visive dorsali deputate all'analisi spaziale, alla localizzazione di oggetti nello spazio, alla percezione del movimento e al controllo delle azioni in tempo reale. Sono diversi i protocolli di immaginazione e osservazione, integrati, ad essere proposti al fine di migliorare la MI. Tra questi lo studio ne presenta tre:

- AO+MI: è la combinazione tra immaginazione e osservazione, senza una specificità di successione o simultaneità tra le due forme;
- AOMI: immaginazione motoria, visiva o cinestetica, e osservazione avvengono simultaneamente;
- AOKI: osservazione visiva e immaginazione cinestetica avvengono simultaneamente.

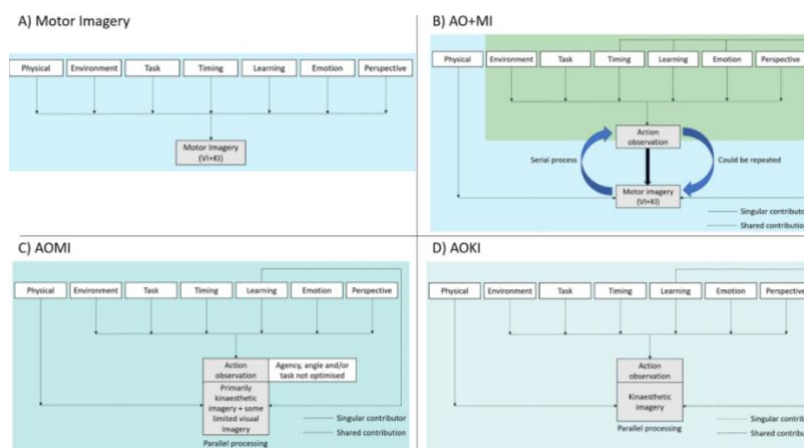


Figura 4. Metodo PETTLEP e nuovi sviluppi di approccio combinato con l'osservazione motoria (fonte Scott et al., 2022)

Nonostante tutto, non si è ancora giunti ad una consolidazione di questi risultati, utile ad un significativo miglioramento degli approcci oggi utilizzati; inoltre, questa continua ricerca ci dimostra come la *Motor Imagery* sia ancora oggi oggetto di studio in continua evoluzione.

1.1.3 MI e sport

“La maggior parte degli atleti d'élite (70-90%) riferisce di usare l'immaginazione motoria per migliorare le proprie prestazioni sportive. Inoltre, i giocatori professionisti di basket, calcio, pallavolo, e gli atleti professionisti di ginnastica, danza e nuoto praticano l'immaginazione motoria più spesso degli amatori.” (Mizuguchi et al., 2012, p. 103). E ancora: “L'efficacia dell'immaginazione nella prestazione sportiva è attestata dai resoconti di diversi atleti provenienti da vari sport, come il nuoto, il baseball, il basket e il football australiano. Inoltre, la maggior parte dei consulenti di psicologia dello sport della squadra olimpica degli Stati Uniti, ha adottato questa tecnica nei loro programmi di allenamento mentale con gli atleti” (Morone et al., 2022, p. 2). Queste due citazioni rendono l'idea di quanto la pratica mentale venga associata all'allenamento fisico e, soprattutto, quanto sia importante per migliorare le prestazioni. Nonostante questa premessa, analizzando la letteratura in merito alle applicazioni dell'*Imagery* in ambito sportivo – soprattutto per quanto concerne gli sport di squadra – non vi sono studi che quantifichino l'influenza effettiva dell'immaginazione in termini di prestazione assoluta. Le uniche applicazioni presenti si riferiscono a componenti tecniche delle gestualità sport specifiche – come, ad esempio, il passaggio, nella pallavolo, o il tiro, nel calcio – senza riuscire a definire quanto i relativi miglioramenti condizionino, in maniera positiva, la prestazione. Di seguito presenterò alcuni lavori basati sulla MI applicata a due diversi sport di squadra.

Un primo studio condotto su trentasei pallavolisti neofiti, Afrouzeh et al. (2015) hanno valutato l'influenza del metodo PETTLEP rispetto al metodo classico di *Imagery*, basato sul rilassamento, sull'abilità del passaggio. I soggetti sono stati divisi randomicamente in tre gruppi: (a) metodo PETTLEP + allenamento pratico, (b) immaginazione tradizionale + allenamento pratico, (c) solo allenamento pratico; i primi due gruppi effettuavano quindici minuti di immaginazione e, successivamente, tredici minuti di tecnica del passaggio, mentre il terzo gruppo eseguiva solo la seconda parte; tutti svolgevano questa tipologia di allenamento tre volte a settimana per sette settimane. L'efficacia dell'*Imagery* è stata valutata tramite tre test svolti uno il primo giorno (*pre-test*), uno l'ultimo giorno (*post-test*) e, il terzo, dopo sette giorni senza allenamento (*retention test*). Il test prevedeva che

gli atleti effettuassero dieci palleggi, in una zona *target*, e che ciascuna prova venisse valutata con un punteggio da 1 a 4. I risultati hanno mostrato che tutte e tre le tipologie di training hanno portato ad un miglioramento del punteggio, in maniera statisticamente significativa; considerato questo, il gruppo che ha eseguito l'allenamento con il metodo PETTLEP è quello che ha prodotto risultati migliori, in termini di punteggio finale, confermando l'ipotesi che questa modalità di immaginazione, abbinata alla pratica fisica, migliora la *performance*. Uno studio basato su una squadra di calcio femminile, condotto da Björkstrand & Jern (2013), ha indagato se un compito di immaginazione basato sul PETTEP potesse migliorare la capacità di battere un rigore. Quarantuno giovani giocatrici tra i 15 e 18 anni di un club finlandese sono state assegnate al gruppo di intervento e a quello di controllo, in maniera equa in base ai loro ruoli in campo. Oltre a valutare l'esito dei *test* pre e post-intervento (si trattava di 10 rigori) è stata esaminata anche l'autoefficacia (*self-efficacy*), l'ansia dei soggetti prima di tirare il rigore e la capacità di lavorare sotto pressione, tramite uno specifico questionario (*Athletic Coping Skills Inventory-28*). Il questionario è composto da 28 affermazioni con quattro alternative di risposta ciascuna: 1, per niente; 2, a volte; 3, spesso; 4, quasi sempre. Il compito del gruppo di intervento era quello di immaginare l'azione del calcio di rigore dieci volte al giorno per cinque giorni. Per coinvolgere tutte le componenti del metodo PETTLEP e simulare la pressione associata al calcio di rigore, era stato detto alle partecipanti, in maniera ingannevole, di trovarsi ad un concorso nazionale in cui i loro risultati sarebbero stati confrontati con quelli di altre squadre. La prima ipotesi dello studio, ossia che il gruppo di intervento che praticava il PETTLEP mostrasse un numero medio di gol più alti rispetto ai controlli, non venne verificata, o meglio, le differenze fra il numero di gol dei due gruppi non furono significative. Tuttavia, il risultato interessante sembrava un altro: le giocatrici che sapevano mantenere alto il loro livello di abilità anche sotto pressione, miglioravano in modo significativo il risultato post-intervento soprattutto se combinato all'*Imagery* PETTLEP. Questa metodologia ha permesso di considerare tutti gli aspetti che possono influenzare la prestazione dell'atleta, sia quelli che possono facilitare la performance, come il focus sulla realizzazione del goal, che quelli che possono ostacolarla, come la paura di fallire. In questo modo,

l'immaginazione si sforza di preparare l'atleta ad affrontare situazioni stressanti e a mantenere la concentrazione sulla performance ottimale. Non è invece stato trovato nessun'associazione tra l'autoefficacia e la capacità di tirare i rigori.

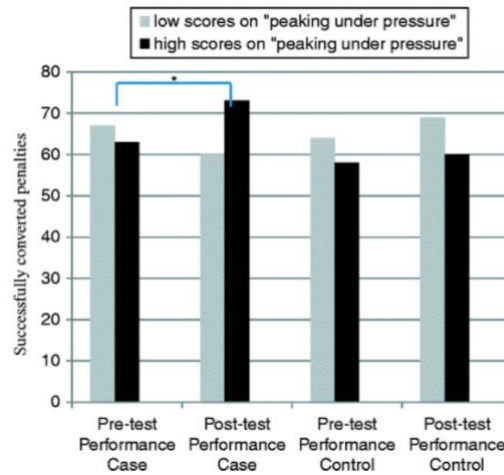


Figura 5. L'effetto della variabile "lavorare sotto pressione" nei calci di rigore. I giocatori che mostrano maggiori punteggi nella capacità di lavorare sottopressione migliorano la prestazione del calcio di rigore del 13,7%, convertendo il 73% dei rigori eseguiti *post-test* contro il 63% della condizione *pre-test* (fonte Björkstrand & Jern, 2013)

Analizziamo ora alcuni studi relativi ad uno sport individuale, in questo caso, il miglioramento di una singola abilità specifica, può aiutare a rendere più efficace la performance assoluta, considerata la minor imprevedibilità dell'ambiente in cui ci si esprime. Uno studio condotto sul tennis tavolo ha cercato di valutare, in maniera oggettiva, l'influenza dell'allenamento mentale sulla riduzione dell'errore nel tempo di anticipazione contendente (CAT - *Coincidence Anticipation Timing*) - ovvero, la capacità di sincronizzare una risposta motoria con un evento esterno in movimento. Le cinquantasei atlete sono state assegnate casualmente ad uno dei quattro gruppi di addestramento: pratica fisica (PP), pratica dell'immaginazione (IP), pratica dell'immagine + pratica fisica (IP + PP) o un gruppo di controllo (CON). Lo studio è stato composto da tre fasi: *pre-test*, intervento e *post-test*. Il soggetto veniva posto di fronte ad un "binario" di led la cui luce si propagava da una fotocellula ad un'altra definita "bersaglio", secondo tre velocità diverse, al fine di simulare l'arrivo della pallina; il compito era quello di muovere la racchetta con l'intento di colpire il led, nell'istante in cui la luce raggiungeva il bersaglio. Il test, composto da nove prove, consisteva nel reagire a ciascuna delle tre velocità della

luce, in ordine casuale, per tre volte. La parte di intervento era differente per i quattro gruppi: il gruppo PP eseguiva sei blocchi del *pre-test* – per un totale di cinquantaquattro tentativi – e, alla fine di ogni blocco, riceveva un *feedback* sull'accuratezza. Il gruppo IP eseguiva lo stesso numero di tentativi totali, seguendo il metodo PETTLEP in maniera dettagliata, cercando anche di immaginare il movimento della racchetta verso il segnale led ma, non riceveva *feedback* al termine delle prove. Il terzo gruppo alternava un blocco di pratica fisica, al termine del quale riceveva un *feedback*, ad un blocco di pratica mentale con il metodo PETTLEP. L'ultimo gruppo, quello di controllo, ha eseguito un compito distrattivo, ininfluenza con il CAT. Dopo ventiquattro ore dal *pre-test* tutte le atlete hanno eseguito il *post-test*, svoltesi nelle stesse modalità; successivamente hanno espresso un parere soggettivo riguardo la validità dell'intervento a cui erano stati sottoposti. I risultati si sono basati su tre tipi di errore: (a) errore costante, indicava se la risposta fosse anticipata o ritardata e, in tal caso, di quanto; (b) errore assoluto, indicava il timing e quindi la precisione; (c) errore variabile, indicava la variabilità delle prestazioni rispetto alla media. Dall'analisi è emerso che i gruppi PP e PP+IP sono quelli che hanno avuto un miglioramento maggiore in termini di precisione e costanza ma, l'efficacia massima, è stata raggiunta solo dal gruppo con l'allenamento integrato. I risultati di questo studio confermano che la pratica concreta è fondamentale per raggiungere un miglioramento prestativo e, in aggiunta, dimostrano quanto un approccio integrato tra *Imagery* e allenamento fisico, rafforzino l'apprendimento. Infine, possiamo constatare che, per un compito complesso come il CAT, un allenamento esclusivamente mentale non porta ad un miglioramento della prestazione (Post et al., 2018). In uno studio condotto da Battaglia et al. (2014), nell'ambito della ginnastica ritmica, venne esaminato l'effetto dell'immaginazione motoria abbinata all'osservazione video sul miglioramento dei salti. Settantadue ginnasti sono stati divisi randomicamente in due gruppi: il primo eseguiva la *video observation* abbinata al metodo PETTLEP e, il secondo, eseguiva solo l'allenamento fisico. Dopo sei settimane di intervento, il gruppo sperimentale mostrò:

- Maggiori miglioramenti nei tempi di volo e nei test di salto verticale (Hopping Test e Drop Jump).

- Una correlazione positiva tra la capacità immaginativa, valutata tramite il MIQ-R, e le performance fisiche ottenute.
- La mancanza di significative differenze nel CMJ tra i due gruppi; a conferma che la durata dell'intervento non era sufficiente per raggiungere cambiamenti morfologici, come l'ipertrofia, necessari per il miglioramento di questi dati.

I risultati ottenuti dimostrano come l'osservazione visiva, abbinata alla MI, contribuisca al potenziamento e, pertanto, ad una resa più economica di alcune qualità sport specifiche. L'ultimo studio preso in analisi riguarda l'utilizzo della MI per migliorare la reattività nell'uscita dai blocchi e nello sprint su trenta metri. Ventiquattro velocisti, divisi ugualmente tra maschi e femmine, appartenenti alla nazionale di atletica pachistana, hanno eseguito un *test* – misurato con le fotocellule – su uscita dal blocco e sprint di trenta metri, entrambi ripetuti tre volte. In seguito, sono stati divisi in due gruppi, di cui il primo eseguiva quindici minuti di immaginazione prima di ogni allenamento, il secondo, quello di controllo, effettuava unicamente la pratica sul campo. I quindici minuti dell'immaginazione consistevano in cinque minuti iniziali di rilassamento e abbassamento della frequenza cardiaca, seguiti da dieci minuti, guidati da uno *script* apposito, focalizzati sulle sensazioni, sulle emozioni, sulle tempistiche e, nei tre minuti finali, sulla tecnica di uscita dal blocco. Il protocollo di allenamenti è stato eseguito per due settimane; al termine gli atleti sono stati nuovamente sottoposti ai *test*. I risultati hanno mostrato una differenza migliorativa, statisticamente riconosciuta ($p < 0.05$), unicamente per il gruppo *Imagery* (Iftikhar et al., 2018). Tenendo conto della durata e della semplicità dell'intervento, possiamo comunque affermare che l'immaginazione ha portato ad un miglioramento significativo in atleti che hanno eseguito le stesse tipologie di allenamenti fisici.

Tutti gli esempi portati mostrano come la MI possa aiutare a migliorare alcune componenti sport specifiche, alcune più influenti sul gesto motorio, altre più legate all'efficacia o al tempo di reazione. Tuttavia, sono diversi gli atleti, soprattutto di alto livello, che eseguono regolarmente l'immaginazione durante la sessione di allenamento – basti pensare a tutti gli sciatori colti, negli istanti che precedono la competizione, nell'atto di mimare i movimenti relativi ai vari passaggi della

discesa; oppure ai piloti di Formula1 che, con le mani sul volante, visualizzano la pista e simulano le curve del tracciato con i rispettivi cambio marcia – senza però che vi siano studi quantitativi che lo possano dimostrare. In conclusione, si può quindi affermare che, in confronto all'effettivo utilizzo, vi pochi studi in letteratura che confermino il reale impatto della MI sulla *performance* sportiva assoluta.

1.2 La corsa e le sue fasi

La corsa rientra tra i sette schemi motori di base dinamici - strisciare, rotolare, arrampicarsi, lanciare, camminare, correre e saltare - ovvero le abilità motorie fondamentali che ogni individuo sviluppa durante l'età evolutiva e che costituiscono il presupposto per l'acquisizione di competenze motorie più complesse. Nelle scienze motorie il cammino viene definito come una successione di sbilanciamenti controllati del corpo in avanti, che consentono lo spostamento mantenendo costantemente il contatto di almeno un piede con il terreno e richiedono un continuo adattamento dei meccanismi di equilibrio. La corsa rappresenta un'evoluzione di questo schema motorio: anch'essa consiste in una successione di sbilanciamenti in avanti, ma è caratterizzata dalla presenza di una fase di volo, durante la quale nessun piede è a contatto con il terreno. Tale peculiarità richiede un livello superiore di controllo motorio, coordinazione ed equilibrio dinamico, rendendo la corsa una delle espressioni più complete delle capacità motorie di base. L'azione ciclica del passo, come precedentemente accennato, è composta da due fasi: la fase di appoggio monopodalico e la fase di volo. La prima, detta anche *stance phase*, prevede quattro sottofasi: contatto iniziale, ammortizzazione e assorbimento delle forze, supporto centrale e spinta. Terminata la fase di volo, l'arto inferiore in avanzamento si prepara al contatto iniziale con il terreno, che può avvenire mediante l'appoggio di tallone (*rearfoot strike*), mesopiede (*midfoot strike*) o avampiede (*forefoot strike*) - all'aumentare della velocità si osserva frequentemente uno spostamento dell'appoggio verso il mesopiede o l'avampiede; Affinché il gesto sia efficiente, il contatto dovrebbe avvenire in prossimità della proiezione del centro di massa sul terreno, limitando le forze frenanti. In questa fase anca e ginocchio sono leggermente flessi. Successivamente il corpo ammortizza le forze di impatto e cerca di trovare un nuovo equilibrio dinamico, grazie all'azione stabilizzatrice del gluteo medio,

all'abbassamento del tallone, all'aumento dell'angolo di flessione del ginocchio e sfruttando la contrazione eccentrica di quadricipite e tricipite surale. Segue la fase di *mid-stance*: il centro di massa corporeo si sposta in avanti grazie all'appoggio monopodalico e il complesso muscolo-tendineo accumula energia elastica che verrà poi rilasciata nell'ultima fase. Infine, la fase di spinta è caratterizzata dalla tripla estensione di anca, ginocchio e caviglia che permette l'avanzamento del corpo ricercando un vettore di forza orizzontale. Questo meccanismo di propulsione sfrutta la terza legge di newton, secondo la quale ad ogni azione esercitata dal piede sul terreno corrisponde una forza di reazione uguale e contraria che contribuisce all'avanzamento del corpo. La spinta termina con lo stacco del piede dal terreno, definito *toe-off*. Tra un appoggio e l'altro vi è la fase di volo. Definita come *swing phase*, inizia con lo stacco del piede dal terreno e termina con il successivo contatto al suolo. Si suddivide in tre sottofasi: oscillazione iniziale, intermedia e terminale. A seguito dello stacco dal terreno, l'arto inferiore non in appoggio, si proietta verso la direzione di avanzamento del corpo, grazie ad una rapida flessione della coscia sul tronco e del ginocchio. Durante la fase intermedia la gamba passa sotto il corpo mentre la coscia raggiunge progressivamente la massima flessione; il movimento è controllato dall'azione coordinata della muscolatura flessoria ed estensoria, che garantisce il corretto posizionamento dell'arto. Durante la *terminal swing* l'arto viene preparato al successivo contatto con il terreno: il ginocchio si estende progressivamente mentre gli ischiocrurali lavorano eccentricamente per rallentare l'avanzamento della gamba e controllare l'estensione del ginocchio, evitando un appoggio eccessivamente anteriore rispetto al centro di massa corporeo. Contemporaneamente la muscolatura della caviglia aumenta la propria *stiffness*, preparandosi a sopportare il carico della successiva fase di appoggio.

1.2.1 Gli aspetti biomeccanici e l'economia di corsa

Comprendere le fasi della corsa, analizzandone le componenti atletiche e le leggi fisiche che vi agiscono, diventa un passaggio fondamentale per introdurre il concetto di biomeccanica. Secondo la voce "Biomeccanica" (s.d.) dell'Enciclopedia Treccani, questa disciplina è definita come "branca della bioingegneria che applica le leggi della fisica allo studio del movimento e dell'equilibrio umano e animale, indagando contemporaneamente sul

comportamento e le proprietà degli organi preposti a tale scopo. Trova applicazione nello sport, dove viene usata per migliorare le prestazioni ottenibili dagli atleti [...]”. L’analisi biomeccanica prende in considerazione tre principali categorie di parametri: cinematici, descrivono il movimento senza considerare le forze, cinetici, descrivono le forze che agiscono sul sistema, e neuromuscolari, riguardano l’attivazione e il coordinamento della muscolatura. Sebbene l’analisi dettagliata delle variabili cinetiche esuli dagli obiettivi del presente elaborato, è opportuno ricordare come elementi quali le forze di reazione al suolo, il tasso di caricamento, i momenti articolari e la potenza muscolare rivestano un ruolo centrale nella valutazione dell’efficienza del gesto. Ai fini del presente studio, risultano particolarmente importanti i parametri cinematici, tra cui la frequenza (*cadence*) e la lunghezza del passo (*stride length*), il tempo di contatto con il suolo (*ground contact time*), l’oscillazione verticale del centro di massa (*vertical oscillation*) e il tempo di volo (*flight time*). La lunghezza del passo corrisponde alla distanza percorsa tra due appoggi consecutivi dello stesso piede, mentre la cadenza indica quanti passi l’atleta effettua nell’unità di tempo – espressa spesso in passi al minuto (*steps per minute*, spm). Queste due variabili determinano congiuntamente la velocità di corsa e la loro modifica comporta variazioni dirette della performance locomotoria. Il tempo di contatto al suolo rappresenta l’intervallo temporale che intercorre tra la fase *foot strike* e la seguente *toe-off*. Infine, l’oscillazione verticale e il tempo di volo – fase tra il *toe-off* precedente e il successivo appoggio del piede – forniscono informazioni sull’efficienza meccanica del gesto: un’eccessiva componente verticale del movimento può comportare un maggiore dispendio energetico, mentre una gestione ottimale della propulsione favorisce l’avanzamento orizzontale e contribuisce a migliorare l’economia di corsa. Esaminata la biomeccanica e i rispettivi valori cinematici, vi è la necessità di chiarire come viene definita l’economia di corsa. Van Hooren et al. (2024, p. 1269) scrivono: “L’economia di corsa (RE) rappresenta la quantità di ossigeno o energia necessaria per correre a una data velocità costante ed è considerata un importante determinante della prestazione di corsa, insieme ad altre variabili come il massimo consumo di ossigeno (VO₂max) e la capacità di correre ad un’alta percentuale di VO₂max”. Nonostante la complessità multifattoriale della RE dovuta

dall'integrazione di caratteristiche metaboliche, cardiorespiratorie, biomeccaniche e neuromuscolari specifiche dell'individuo (Barnes & Kilding, 2015), dalla letteratura emerge che l'ottimizzazione delle componenti biomeccaniche e spaziotemporali eserciti un ruolo cruciale sull'efficienza del gesto (Van Hooren et al., 2024). Uno studio condotto da Folland et al. (2017) evidenzia come tre delle componenti cinematiche – l'oscillazione verticale del bacino normalizzata all'altezza durante il contatto con il suolo, l'angolo minimo del ginocchio durante il contatto e la velocità orizzontale minima del bacino – spiegano da sole il 39% della variabilità del costo energetico. In aggiunta, un tempo di contatto al suolo più prolungato, analizzato su corridori di fondo altamente allenati, è associabile ad una RE maggiore. Questo riscontro trova una sua spiegazione a livello anatomico nelle differenze evidenziate dallo studio della sezione trasversa della muscolatura estensoria e flessoria del ginocchio. Atleti con un volume muscolare maggiore, a livello della coscia, presentavano tempi di contatto più brevi poiché, all'impatto con il terreno, producevano una grande quantità di forza esplosiva, altamente dispendiosa e inefficiente ai fini di una migliore RE (Tanji et al., 2024). Al contrario, non vi sembra essere una superiorità univoca in termini energetici per quanto riguarda l'appoggio del piede – che avvenga di avampiede o di tallone – suggerendo che siano l'anatomia e le preferenze spontanee del corridore a definire quale approccio risulti più vantaggioso (Moore, 2016). Tutti questi adattamenti operano secondo un meccanismo di auto-ottimizzazione, che il corridore sviluppa in base alle proprie caratteristiche individuali, finalizzato a ridurre i carichi di impatto nella fase iniziale della falcata. A supporto di questa natura spontanea del gesto, Schücker & Parrington (2019) hanno dimostrato come il controllo cosciente e volontario del movimento disturbi i pattern motori automatizzati, allontanando l'atleta dalla sua coordinazione ottimale. Nello specifico, l'adozione di un focus attentivo interno rivolto alla tecnica corporea incrementa l'oscillazione verticale del centro di massa, mentre la concentrazione sul respiro ne altera il pattern ventilatorio; entrambe le strategie cognitive si traducono, di fatto, in un peggioramento dell'economia di corsa. L'efficacia di questi processi di ottimizzazione inconscia è evidente soprattutto nei corridori d'élite: dagli studi di Slawinski & Billat (2004) emerge infatti come gli atleti più esperti riescano a diminuire il costo meccanico potenziale,

a parità di costo energetico globale, rispetto ai non allenati. Tuttavia, la stabilità di tali equilibri biomeccanici è fortemente condizionata dall'insorgere della fatica. Dal punto di vista scientifico si osserva come, già dopo i primi due chilometri di corsa, vi sia un progressivo spostamento del lavoro meccanico positivo dalle articolazioni distali della caviglia a quelle prossimali del ginocchio e dell'anca, indipendentemente dal tipo di calzatura indossata (Sanno et al., 2021). Parallelamente, grazie all'incremento delle proprietà ingegneristiche delle scarpe – riduzione del peso, aumento del ritorno elastico grazie all'uso di schiume e inserimento di piastre rigide in carbonio – si è riusciti a raggiungere un miglioramento meccanico della RE (nell'ordine del 3-4%), mantenendo invariato il consumo massimo di ossigeno. Questo vantaggio si è tradotto in un guadagno cronometrico che ha reso possibile l'abbattimento di barriere storiche, come quella delle due ore nella maratona (Hoogkamer et al., 2017).

Un ultimo aspetto da trattare riguarda le differenze che vi possono essere nella corsa su strada rispetto a quella su *treadmill*, considerato uno strumento fondamentale in ricerca per poter standardizzare le differenti prove e per la facilità di campionamento, e analisi, dei gas (Barnes & Kilding, 2015). Se si considerano il movimento e le forze registrate, si può affermare che i valori ottenuti sono generalmente sovrapponibili tra la corsa sul tapis roulant e quella all'aperto (Riley et al., 2008). Ciononostante, si trovano in letteratura diverse meta-analisi che evidenziano alcune differenze. Riley et al. (2008) hanno dimostrato che l'impatto con il tappeto porta a delle piccole ma significative differenze nella flessione del ginocchio, nella gestione delle potenze articolari e nei picchi delle forze di impatto con il terreno. In aggiunta, anche l'oscillazione verticale e l'angolo con cui il piede impatta sul nastro differiscono dai valori registrabili nella corsa su strada (Van Hooren et al., 2020). Le discrepanze analizzate non dipendono dal movimento del nastro, ma da fattori quali: la diversa rigidità della pedana rispetto all'asfalto, la totale assenza della resistenza dell'aria e una differente percezione visiva della velocità (Van Hooren et al., 2020). In conclusione, si può affermare che i risultati ottenuti dalla corsa sul tapis roulant sono utili per studiare e approfondire il concetto di RE; tuttavia, è necessario prestare una maggiore cautela se si intende trasferire i dati raccolti alle condizioni di gara. Una maggiore rigidità del tappeto, una

precisione sulla taratura della velocità e la familiarità dell'atleta rispetto all'attrezzo, favoriscono la riduzione dell'errore che scaturisce dalle differenze evidenziate.

1.3 La Motor Imagery nella corsa

Nonostante i numerosi riscontri a supporto della *Motor Imagery* nella letteratura sportiva generale, le evidenze relative all'efficacia di questa metodica applicata specificamente alle determinanti biomeccaniche e metaboliche della corsa non mostrano un quadro altrettanto esaustivo. Infatti, allo stato attuale delle conoscenze, la letteratura scientifica è mancante di studi che indaghino direttamente gli effetti della MI sulla RE, così come rimangono esigui i contributi volti ad analizzare gli effetti della pratica mentale sulla cinematica della corsa. Per ovviare a questa carenza, la ricerca si è parzialmente concentrata su strategie affini di *gait retraining* (riscrittura del passo); a tal proposito, Van Den Berghe et al. (2024) hanno evidenziato come sia possibile indurre modifiche nella tecnica di corsa sfruttando biofeedback acustici, visivi o istruzioni focalizzate sul focus attentivo.

Sebbene i dati diretti sulla corsa d'endurance siano limitati, il principio secondo cui la MI possa effettivamente modificare e perfezionare i pattern locomotori fondamentali trova parziale riscontro in altri ambiti della letteratura sul movimento umano. In ambito clinico e neurobiologico, ad esempio, Nicholson et al. (2018) hanno dimostrato che persino una singola seduta di MI somministrata ad adulti anziani è in grado di indurre un perfezionamento della pianificazione motoria, ottimizzando la congruenza tra il movimento immaginato e quello realmente eseguito durante compiti di mobilità funzionale come il *Timed-Up-and-Go*.

Il trasferimento di questi meccanismi di coordinazione spaziotemporale a gesti più dinamici è stato ulteriormente indagato da Fusco et al. (2014) i quali hanno confrontato l'efficacia dell'immaginazione motoria statica e dinamica rispetto all'esecuzione reale di compiti di locomozione (quali camminata, corsa leggera e deambulazione non lineare) su una distanza di dieci metri. I loro risultati hanno evidenziato come la MI di tipo dinamico, ovvero eseguita compiendo passi sul posto durante la visualizzazione mentale, permetta di ottenere tempi di percorrenza e numero di passi quasi sovrapponibili all'esecuzione reale. Questo fenomeno conferma l'esistenza di una reale equivalenza neurofunzionale tra il gesto simulato

mentalmente e quello praticato, suggerendo come pattern motori complessi e consolidati – seppur studiati prevalentemente nella camminata – possano beneficiare dell'allenamento mentale per il consolidamento e l'ottimizzazione della spinta.

1.4 Obiettivo dello studio

Il vuoto letterario riscontrato nel contesto dell'endurance offre lo sfondo ideale per esplorare, in chiave sperimentale, il legame diretto tra l'allenamento mentale e la cinematica della corsa ad alta intensità. Sebbene l'immaginazione motoria sia ampiamente riconosciuta come uno strumento efficace per l'ottimizzazione del controllo motorio, le evidenze circa i suoi effetti acuti sulla biomeccanica della falcata rimangono pressoché assenti. Questo studio, pertanto, si pone l'obiettivo di indagare le modificazioni cinematiche immediate prodotte da una singola seduta di MI durante una prova su *treadmill* condotta fino all'esaurimento.

2. CONTIRBUTO SPERIMENTALE

2.1 MATERIALI E METODI

2.1.1 Partecipanti

Il campione dello studio ha visto la partecipazione di ventisei studenti universitari attivi (13 maschi e 13 femmine), le cui caratteristiche sono riportate nella Tabella 1.

Tabella 1. Descrizione dati antropometrici dei soggetti.

Variabile	Totale (n=26)	Maschi (n=13)	Femmine (n=13)
Età (anni)	24 ± 4,1	23,1 ± 1,2	25 ± 5,6
Altezza (m)	1,72 ± 0,08	1,78 ± 0,05	1,65 ± 0,06
Peso (kg)	67,4 ± 11,1	74,5 ± 10,4	60,3 ± 6,3

I ventisei soggetti sono stati divisi randomicamente, in singolo cieco, in due gruppi, di ugual numero:

- Gruppo sperimentale (MI)
- Gruppo di controllo (CONTR)

Il primo gruppo eseguiva un protocollo di *Motor Imagery* di tipo PETTLEP prima dell'esecuzione effettiva della prova; al gruppo di controllo è stata assegnata la lettura di un articolo sulla biomeccanica e l'economia di corsa. Tutti i soggetti possedevano una precedente familiarità con la corsa sul tapis roulant.

2.1.2 Protocollo sperimentale

L'esperimento è stato gestito da due operatori, svolto in singolo cieco e strutturato in due parti: la prima consisteva nell'esecuzione del *test* incrementale cardiopolmonare (CPET) e, la seconda, prevedeva la prova ad esaurimento (TTE), preceduta dal protocollo tipico del gruppo di appartenenza (Billat et al., 1996). Ogni soggetto raggiungeva il laboratorio in uno *slot* orario prestabilito dagli operatori e distanziato dal soggetto successivo, in modo tale da non far avvenire un contatto tra i partecipanti. Veniva assegnato randomicamente ad uno dei due gruppi, senza essere informato sul gruppo di appartenenza, e forniva i dati biometrici riguardanti il sesso, l'età, il peso, l'altezza e la data di nascita. In seguito, a prescindere dal

protocollo sperimentale, gli veniva somministrato il questionario di immaginazione motoria (MIQ-R).

Preparazione del soggetto

La preparazione per il CPET prevedeva che il soggetto indossasse, aiutato da un operatore, l'orologio Garmin, la fascia cardio Polar e il Garmin Running Dynamics Pod, posto sulla bassa schiena, fondamentale per registrare i parametri biomeccanici. Inoltre, in questa fase, veniva informato sul protocollo del test e su tutti gli aspetti sperimentali, al fine di poter svolgere e terminare la prova in totale sicurezza. Come ultimo passaggio prima di iniziare il *test*, un operatore posizionava la maschera – collegata al Metabolimetro Cosmed K5 – utile per registrare la capacità polmonare e gli scambi respiratori del soggetto.

CPET

Il *test* prevedeva una partenza da 6 km/h con un incremento di 2 km/h ogni tre minuti, la pendenza del tappeto era dello 0% (Folland et al., 2017); ciascun partecipante era libero di interrompere la prova in un qualsiasi momento spostando, con un balzo, i piedi a lato del tappeto. Al termine di ogni *step* incrementale, veniva chiesto al soggetto di segnalare, con cenno della mano, la sua percezione dello sforzo sulla scala RPE 1-10. Durante la prova un operatore si occupava di segnare, per ogni *step* completato, i parametri di VO_2 max, percezione dello sforzo e frequenza cardiaca, mentre l'altro operatore si occupava della sicurezza del soggetto fornendo, se necessari, alcuni *feedback* in merito alla sua posizione. Al termine della prova, il soggetto registrava l'RPE finale sull'orologio e veniva aiutato da un operatore a rimuovere tutti i dispositivi. In contemporanea, l'altro operatore segnava tutti i dati – tempo totale, percezione dello sforzo finale, frequenza cardiaca minima e massima, lunghezza del passo media, cadenza media, oscillazione verticale, tempo medio di contatto con il suolo e rapporto verticale – registrati dall'applicazione Garmin collegata all'orologio e al sensore dinamico.

Individuazione della vVT2

Per individuare la velocità della seconda soglia ventilatoria (vVT2) sono stati analizzati i grafici ottenuti durante il CPET mediante il software COSMED OMNIA. Dall'analisi degli scambi gassosi, secondo le metodologie proposte da

Beaver et al. (1986), è possibile osservare che, in prossimità della seconda soglia ventilatoria, la produzione di anidride carbonica (VCO_2) aumenta in misura maggiore rispetto al consumo di ossigeno (VO_2). Tale fenomeno è riconducibile al progressivo accumulo di lattato e di ioni H^+ durante l'esercizio ad elevata intensità. Gli ioni H^+ vengono tamponati principalmente dal sistema bicarbonato, con conseguente produzione aggiuntiva di CO_2 . L'aumento della CO_2 da eliminare determina un incremento della ventilazione e porta alla comparsa del punto di compensazione respiratoria (Respiratory Compensation Point, RCP), utilizzato per l'identificazione della seconda soglia ventilatoria ($VT2$). L'individuazione grafica del RCP è stata effettuata mediante l'analisi del grafico che mette in relazione la ventilazione minuto (VE) con la produzione di anidride carbonica (VCO_2). In corrispondenza della $VT2$ si osserva un secondo incremento della pendenza della curva, indicativo di un aumento sproporzionato della ventilazione rispetto alla produzione di CO_2 (Beaver et al., 1986). L'identificazione della $VT2$ è stata ulteriormente confermata mediante l'analisi degli equivalenti ventilatori (VE/VO_2 e VE/VCO_2). In prossimità della $VT2$, infatti, il VE/VCO_2 , dopo aver raggiunto un valore minimo, inizia ad aumentare progressivamente, mentre il VE/VO_2 risulta già in aumento dalla prima soglia ventilatoria. La velocità corrispondente a tale evento è stata registrata come $vVT2$.

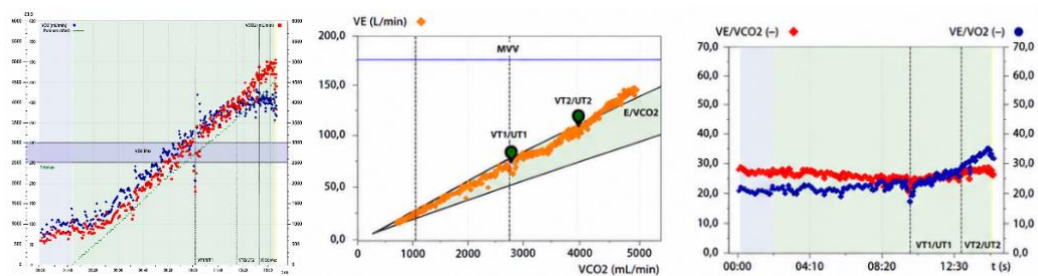


Figura 6. Grafici CPET, in ordine da sinistra verso destra: grafico relativo agli scambi gassosi, grafico relativo alla ventilazione e grafico degli equivalenti ventilatori.

Protocollo MI/CONTR

La seconda seduta si svolgeva ventiquattro ore dopo il CPET e, ciascun soggetto, veniva sottoposto al protocollo relativo al gruppo sperimentale di appartenenza. Dopo aver indossato l'orologio e il sensore, il soggetto si posizionava sul tapis roulant, in posizione ortostatica e con il tappeto fermo, pronto ad iniziare. I protocolli erano differenti:

- I soggetti del gruppo MI, a cui veniva chiesto di chiudere gli occhi, effettuavano un allenamento di *Motor Imagery* di tipo PETTLEP per novanta secondi. L'immaginazione era guidata da uno *script* letto dall'operatore, diviso in due parti: dapprima, per trenta secondi, veniva chiesto all'atleta di concentrarsi su quei parametri fisiologici che variano durante uno sforzo intenso – il respiro, il battito cardiaco, la contrazione dei muscoli delle gambe; in seguito l'attenzione veniva posta sulla tecnica di corsa: all'atleta veniva chiesto di immaginare di iniziare l'appoggio a terra dal tallone e di completare bene la spinta, cercando di tenere il bacino stabile e basso, in modo da disperdere il minor numero possibile di energie. Terminata la lettura dello *script* i soggetti eseguivano l'immaginazione per un minuto. Al termine, veniva chiesto all'atleta di valutare la vividezza della sua immaginazione e la positività, o negatività, delle emozioni provate.
- I soggetti del gruppo CONTR, per novanta secondi, leggevano un articolo che li informasse dell'efficacia di una buona biomeccanica di corsa sull'economia del gesto. In uno studio condotto da Rogers (2006), si è visto che i compiti mentali permettono di migliorare la *performance* perché aumentano la concentrazione del soggetto e la sua capacità attentiva. Tra i vari compiti cognitivi, oltre all'immaginazione motoria, vi è anche la lettura - mentre si scorrono le parole, la nostra mente crea una riproduzione degli eventi attivando alcune aree deputate al movimento. Pertanto, l'esecuzione di un compito mentale da parte del gruppo di controllo, aveva il fine di ridurre al minimo la possibilità che gli eventuali miglioramenti dipendessero semplicemente da un maggior *focus* attentivo, a discapito della MI.

TTE

La seconda fase dell'esperimento era la medesima per i gruppi. I soggetti dovevano completare una corsa fino ad esaurimento (*time-to-exhaustion*, TTE) correndo alla velocità della soglia anaerobica (vVT2); in accordo con l'approccio proposto da Billat et al. (1996), l'intensità del test a esaurimento è stata individualizzata sulla base dei risultati ottenuti durante il test incrementale preliminare. Il protocollo non

prevedeva una fase di accelerazione, pertanto, i soggetti, partivano con i piedi ai lati del tapis roulant, quindi l'operatore azionava il tappeto e, raggiunta la velocità indicata, faceva partire il tempo sull'orologio del soggetto, la quale prontamente iniziava la sua corsa. Ciascun soggetto era libero di terminare la prova nel momento in cui lo sforzo non risultasse più sostenibile. Terminato il *test*, un operatore si occupava di rimuovere i dispositivi dal soggetto, mentre l'altro trascriveva i dati relativi alla prestazione: tempo totale, percezione dello sforzo finale, frequenza cardiaca minima e massima, lunghezza del passo media, cadenza media, oscillazione verticale, tempo medio di contatto con il suolo e rapporto verticale.

2.1.3 Strumentazioni

Lo studio ha previsto l'utilizzo delle seguenti strumentazioni:

- Cosmed - K5 – un sistema metabolico indossabile pensato per misurare gli scambi gassosi sia in un ambiente di laboratorio, chiuso e controllato, che all'aperto. Questo dispositivo medico viene impiegato in ambiti diversi tra cui medicina dello sport e riabilitazione; infatti, grazie alla trasmissione di dati wireless consente di effettuare *test* clinici e fare una valutazione delle performance sportive. Permette di acquisire molti parametri, tra i più importanti troviamo: consumo di ossigeno, produzione di anidride carbonica, ventilazione, frequenza cardiaca e dispendio energetico- e la relativa maschera.
- Software OMNIA – compatibile con i dispositivi Cosmed – utilizzato per raccogliere i dati del *test* CPET e individuare la VT2.
- Dispositivi Garmin: orologio Forerunner 955, il Running Dynamics Pod - un sensore che rileva i parametri biomeccanici della corsa, quali la cadenza, il tempo di contatto, l'oscillazione verticale e la lunghezza del passo - e l'applicazione collegata a questi dispositivi per poter revisionare tutti i dati inerenti all'attività. L'efficacia del RDP come sensore per registrare l'oscillazione verticale è stata valutata da Smith et al. (2022) in uno studio in cui i dati raccolti dai dispositivi, sono stati sovrapposti con quelli relativi all'analisi video del gesto.
- Fascia cardio Polar h9.

- Tapis roulant: Emotion Runner, MTC Climb 2000.

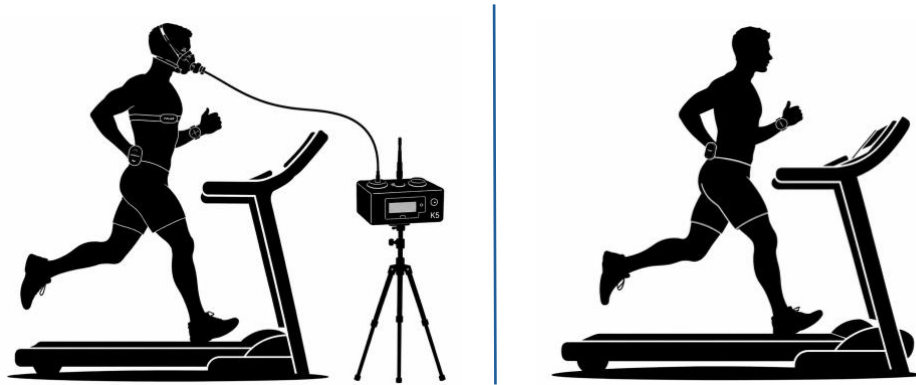


Figura 7. Immagini create con ChatGPT, rappresentano il *setting* delle due prove: la figura a sinistra è relativa al *test* incrementale, mentre quella di destra raffigura la prova ad esaurimento.

2.1.4 Scale valutative (questionario MIQ-R e scala RPE)

Come precedentemente esplicitato nel paragrafo relativo alla procedura sperimentale, tutti i soggetti hanno dapprima svolto, il “*Motor Imagery Questionnaire – Revised*” (MIQ-R). Un questionario ideato da Hall & Martin nel 1997 ed utilizzato per valutare la capacità immaginativa di un soggetto, nelle due diverse forme – visiva e cinestetica. La versione proposta nell’esperimento era adattata in italiano e prevede l’esecuzione, e la seguente immaginazione, di quattro movimenti ripetuti per entrambe le modalità di MI. Ogni gesto motorio viene prima proposto dall’operatore, successivamente eseguito dal soggetto e, infine, immaginato in maniera visiva o cinestetica. Al termine di ogni movimento il soggetto valuta la sua capacità immaginativa grazie ad una scala Likert a sette punti che indica la difficoltà del soggetto di “vedere” o “sentire” il movimento.

SCALE di VALUTAZIONE

Scala di immaginazione visiva

- 1 = veramente facile da “vedere”
- 2 = facile da “vedere”
- 3 = abbastanza facile da “vedere”
- 4 = neutra (né facile, né difficile)
- 5 = abbastanza difficile da “vedere”
- 6 = difficile da “vedere”
- 7 = veramente difficile da “vedere”

Scala di immaginazione cinestetica

- 1 = veramente facile da “sentire”
- 2 = facile da “sentire”
- 3 = abbastanza facile da “sentire”
- 4 = neutra (né facile, né difficile)
- 5 = abbastanza difficile da “sentire”
- 6 = difficile da “sentire”
- 7 = veramente difficile da “sentire”

Figura 8. Scala di valutazione del MIQ-R, adattata in italiano.

Come secondo strumento di autovalutazione è stata utilizzata, durante il CPET e al termine della prova ad esaurimento, la scala di percezione dello sforzo (RPE - *Rate of Perceived Exertion*) o, più comunemente nota come scala di Borg. Consiste in una scala numerica, lo studio ha previsto l'utilizzo di quella 1-10, associata a descrizioni verbali, che correla lo sforzo fisico a segnali corporei come frequenza cardiaca e respiro. È altamente soggettiva e richiede che gli atleti abbiano una buona percezione del proprio corpo e della fatica accumulata; infatti, il valore dato, tiene conto delle sensazioni fisiche quali sudorazione, battito cardiaco, contrazione muscolare, respiro affannoso, e di quelle mentali, come la capacità di sopportare ulteriormente uno sforzo già intenso. È importante sottolineare che, graficamente, la scala parte da zero ma, quest'ultimo, non esiste come valore in ambito sportivo e in riferimento a funzioni quotidiane. Pertanto, i soggetti sono stati sensibilizzati nel riferire il numero 1 come valore allo stato basale *pre-test*.



Figura 9. Scala di percezione dello sforzo, RPE, 1-10.

2.1.5 Analisi dati

I dati sono stati raccolti manualmente durante le prove e successivamente trascritti su un foglio Excel; da qui sono stati divisi nei due gruppi sperimentali per calcolare le rispettive media e deviazione errore di: velocità, tempo, cadenza, lunghezza del passo, oscillazione verticale, rapporto verticale e tempo di contatto al suolo. Successivamente sono state fatte tre diverse analisi statistiche: per prima cosa è stata svolta un'analisi GLM multivariata (*General Linear Model - Multivariate*), su entrambi i test, con l'obiettivo di indagare le possibili differenze allo stato basale e dopo l'intervento, tenendo in considerazione tutti i parametri raccolti. Come

secondo passaggio è stata svolta un'analisi univariata (*Univariate analyses*) per indagare l'influenza di ogni singolo parametro sulla prestazione e le possibili differenze, statisticamente significative, tra i due gruppi. Infine, è stata svolta l'analisi di regressione gerarchica (*Hierarchical regression analysis*) al fine di indagare quale, dei diversi parametri, influenzasse maggiormente le differenze riscontrate.

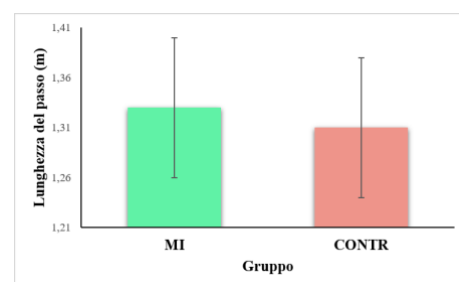
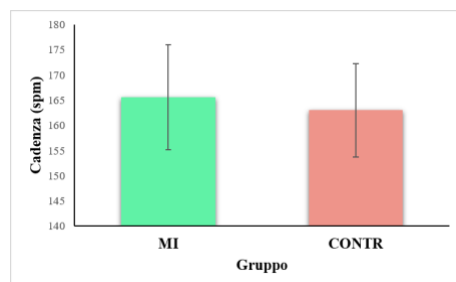
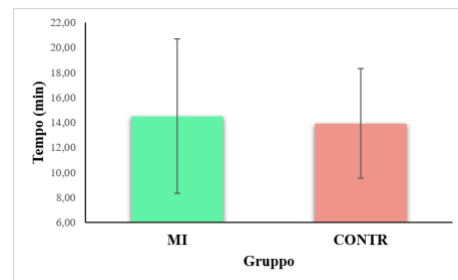
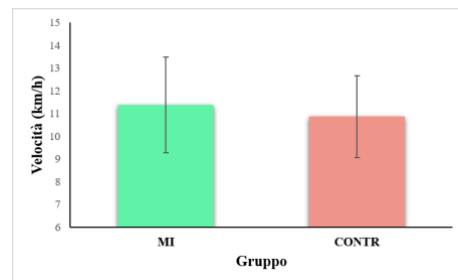
3. RISULTATI

I risultati dello studio sono presentati secondo la successione e la progressiva specificità dell'analisi svolta. Nella tabella sottostante si visualizzano i dati relativi alla media e alla rispettiva deviazione standard dei valori registrati nel TTE.

Tabella 2. Media e deviazione standard dei dati relativi al TTE

Group	Velocity (km/h)	Time (min)	Cadence (spm)	Stride Length (m)	Vertical Oscillation (cm)	Vertical Ratio (%)	GCT (ms)
MI	11,38 ± 2,10	14,50 ± 6,19	165,62 ± 10,40	1,33 ± 0,07	9,92 ± 1,56	7,32 ± 1,18	240,08 ± 17,96
CONTR	10,86 ± 1,80	13,92 ± 4,38	163,00 ± 9,26	1,31 ± 0,07	11,14 ± 2,34	8,68 ± 1,77	243,23 ± 29,10

L'analisi GLM multivariata è stata svolta su entrambi i *test* – CPET e TTE – inserendo la cadenza, la lunghezza del passo, l'oscillazione verticale, il tempo di contatto al suolo e il rapporto verticale (ottenuto dal rapporto tra l'oscillazione verticale e la lunghezza del passo), come variabili dipendenti mentre la velocità è stata usata come covariata con lo scopo di indagare se vi fossero differenze tra i due gruppi indipendentemente dal valore di quest'ultima. In entrambi i test l'analisi non ha evidenziato nessuna differenza statisticamente significativa nella biomeccanica globale dei due gruppi. Tuttavia, le analisi univariate svolte sul TTE hanno evidenziato delle differenze statisticamente significative nel rapporto verticale ($p=0.032$), con un valore minore osservato nel gruppo MI (7.32 ± 1.18 %) rispetto al gruppo CONTR (8.68 ± 1.77 %). Inoltre, come si osserva nella Tabella 2., anche il tempo totale della prova era maggiore nel gruppo sperimentale, senza però raggiungere una differenza significativa.



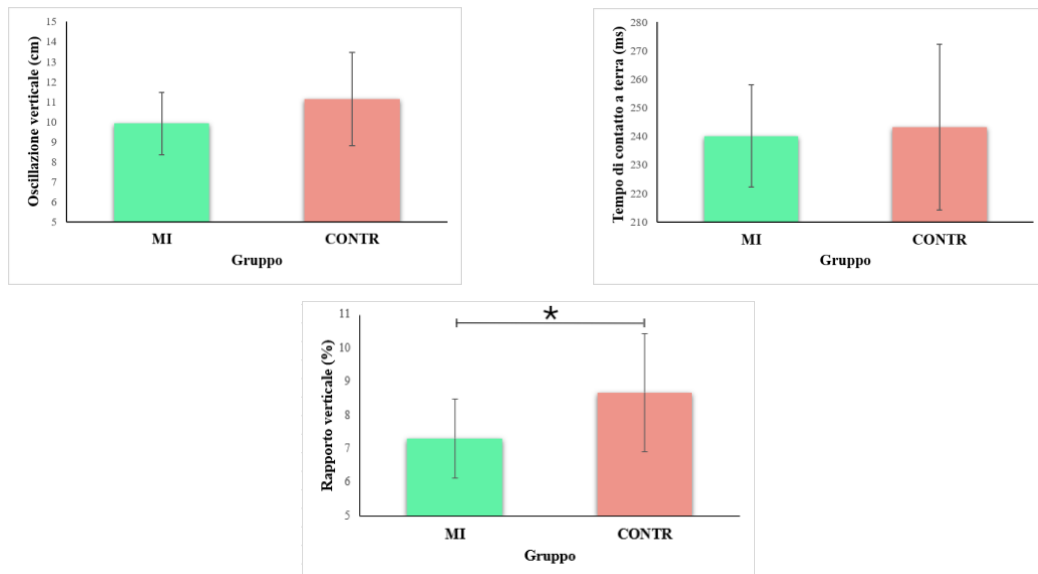


Figura 10. Grafici a istogramma con le rispettive barre di errore, relative alla deviazione standard, dei parametri prestativi e biomeccanici del *time-to-exhaustion* (TTE) test.

Questi risultati suggeriscono che la biomeccanica di corsa del gruppo MI sembrerebbe essere migliore, inoltre, l'analisi di regressione lineare ha evidenziato come l'appartenenza al gruppo spieghi per il 18% la differenza del rapporto verticale ($\Delta R^2 = 0.184$, $p = 0.029$), mentre la velocità, più elevata per il gruppo MI, non risultava essere un fattore determinante ($p = 0.820$).

4. DISCUSSIONE

Questo studio si è posto l'obiettivo di valutare se una singola seduta di immaginazione motoria fosse in grado di modificare, possibilmente in maniera vantaggiosa, alcuni parametri biomeccanici della corsa in runner non professionisti. L'ipotesi di partenza era che l'allenamento mentale, integrato alla pratica fisica immediata, potesse ottimizzare le componenti cinematiche rendendo migliore l'economia di corsa rispetto al gruppo di controllo. Sebbene l'analisi globale multivariata non abbia evidenziato un effetto macroscopico del protocollo sull'insieme dei parametri considerati, l'approfondimento analitico sulle singole variabili ha fatto emergere un dato di forte interesse scientifico. Si è registrata, infatti, una variazione significativa del rapporto verticale nei soggetti sottoposti a *Motor Imagery*. L'analisi di regressione lineare ha confermato la solidità di questo riscontro, indicando come proprio l'appartenenza al gruppo sperimentale influenzasse in maniera significativa tale modifica cinematica.

L'analisi preliminare delle condizioni di partenza (*baseline*) ha confermato l'omogeneità iniziale dei due gruppi. Il fatto che non siano emerse discrepanze biomeccaniche significative nella fase di *pre-test* – nonostante le inevitabili variabilità individuali in termini di velocità e tempi di percorrenza – ha permesso di escludere potenziali fattori di confondimento sistemici. Questo dato stabilisce una linea di partenza uniforme per il campione, conferendo una maggiore validità interna al protocollo sperimentale e garantendo che le successive variazioni cinematiche siano attribuibili esclusivamente all'intervento di MI. Entrando nell'analisi dettagliata dei parametri cinematici, la riduzione del rapporto verticale, esclusivamente nel gruppo sperimentale, rappresenta il riscontro biomeccanico più rilevante dell'intero intervento. Questo dato risulta eccezionalmente nitido alla luce dell'analisi disaggregata delle sue componenti: a fronte di una lunghezza media della falcata sovrapponibile tra i due gruppi (1.33 m vs 1.31 m), il decremento del *vertical ratio* è stato guidato unicamente dalla registrazione di un dato medio minore dell'oscillazione verticale nel gruppo sottoposto a MI (9.92 cm vs 11.14 cm). Tale dinamica evidenzia una netta ottimizzazione della propulsione secondo un vettore di forza orizzontale. I modelli di regressione hanno inoltre evidenziato che la differenza di velocità, più elevata per il gruppo MI, non influenzasse in maniera significativa tale incremento biomeccanico. Pertanto, si può affermare che

i soggetti sottoposti al protocollo sperimentale hanno mostrato una tendenza al miglioramento della loro economia di corsa, riducendo il dispendio energetico associato alle oscillazioni verticali. Questo adattamento in acuto, sebbene limitato ad una singola seduta di MI, trova una solida giustificazione nel principio di equivalenza funzionale. Infatti, come si evince dalla meta-analisi condotta da Guillot et al. (2014), l'immaginazione motoria attiva reti neurali in gran parte sovrapponibili a quelle deputate al movimento. Inoltre, in linea con quanto ipotizzato da Nicholson et al. (2018) sui pattern di pianificazione motoria, la stimolazione mentale delle aree cerebrali motorie sembra aver migliorato la rappresentazione interna del gesto prima dell'azione fisica, aumentando il focus attentivo. Tale schema è stato consolidato grazie all'esecuzione pratica che seguiva la MI, come sottolineato nello studio di Cumming & Ramsey (2009). Infine, si può affermare che le istruzioni cinestetiche evidenziate durante la lettura dello script secondo il metodo PETTLEP, hanno agito in modo analogo ai meccanismi di biofeedback studiati da Van Den Berghe et al. (2024). Questo ha contribuito a ottimizzare la canalizzazione delle risorse attentive, riducendo le dispersioni energetiche verticali. Un ultimo aspetto importante da considerare riguarda la tipologia della prova, condotta fino all'esaurimento. Sebbene la natura cumulativa del dato (espresso come media dell'intera prova) non permetta di isolare cinematicamente la fase di crollo atletico, la letteratura biomeccanica concorda sul fatto che l'insorgenza della fatica conduca ad un progressivo deterioramento della tecnica di corsa, provocando un aumento dell'oscillazione verticale dovuto ad una riduzione della capacità del corpo di assorbire gli impatti e ridistribuire le forze propulsive (Sanno et al., 2021). Il fatto che il gruppo sperimentale abbia mantenuto un'oscillazione verticale mediamente inferiore di circa l'11% rispetto al controllo sull'intero arco del test, suggerisce che la *Motor Imagery* possa aver esercitato un ruolo "protettivo" globale. Stabilizzando un pattern motorio più economico fin dalle prime battute, l'intervento ha permesso ai soggetti di mitigare l'impatto del decadimento tecnico indotto dal progressivo accumulo della fatica frutto dell'elevato *stress* metabolico registrato durante la prova.

Dall'altra parte, l'assenza di una significatività nelle variazioni relative agli altri parametri biomeccanici – quali il tempo di contatto al suolo, la cadenza e la

lunghezza del passo – non deve essere letta come un fallimento del protocollo, bensì come un indicatore della specificità della singola seduta di MI. L'intervento mentale, infatti, era guidato da uno script strutturato per indirizzare il focus degli atleti specificamente sull'appoggio del piede e sul mantenimento del bacino in una posizione stabile, preservando la linearità del movimento ed evitando la dispersione verticale delle forze. Questa constatazione supporta due possibili interpretazioni teoriche: la prima risiede nel fatto che le altre variabili necessitino di un condizionamento neuromuscolare cronico e adattamenti plastici sul lungo periodo per essere stabilmente modificati; la seconda suggerisce che la MI agisca canalizzando il focus attentivo su un macro-obiettivo per volta e che, pertanto, i runner abbiano ottimizzato selettivamente la componente cinematica maggiormente sollecitata durante la visualizzazione mentale. Infine, un ruolo cruciale va attribuito all'esperienza del campione. Come sottolineato da Slawinski & Billat (2004), i runner più esperti possiedono una maggiore capacità di controllo e autoregolazione del movimento rispetto agli amatori; a ciò si aggiunge il fatto che l'esperienza sul campo amplifica l'efficacia stessa dell'immaginazione motoria, facilitando la creazione di immagini mentali più vivide e accurate (Guillot & Collet, 2005b). Di conseguenza, il raggiungimento di una variazione significativa in un campione di runner non professionisti, avvalorava ulteriormente l'efficacia della stimolazione introdotta.

Dal punto di vista pratico, la tendenza riscontrata di una riduzione del rapporto verticale, nonostante la condizione di fatica, può favorire una riduzione degli infortuni. Infatti, una minore oscillazione del centro di massa comporta un decremento della forza di impatto (*ground reaction force*) che le strutture articolari e muscolo-tendinee devono sopportare per ogni appoggio della falcata. Se si considera la natura ciclica e ripetitiva della corsa prolungata, la riduzione cumulativa di questo stress meccanico suggerisce un significativo guadagno in termini di longevità fisica e integrità dell'atleta. In conclusione, i riscontri di questa ricerca dimostrano come la *Motor Imagery* possa configurarsi come uno strumento integrativo altamente efficace, economico e di immediata applicazione pratica. La capacità di influenzare positivamente l'economia di corsa in runner amatoriali, senza richiedere un ulteriore dispendio energetico o metabolico, conferisce un

valore aggiunto alla programmazione metodologica dell'allenamento, aprendo nuove prospettive per l'ottimizzazione della performance e della salute del podista.

4.1 Possibili studi futuri

I limiti intrinseci del presente lavoro scientifico tracciano una linea guida fondamentale per l'ampliamento delle prospettive di ricerca future. In primo luogo, il reclutamento di un campione più ampio e statisticamente robusto risulterebbe determinante per confermare e generalizzare le tendenze biomeccaniche osservate in questa sede su scala ridotta.

In secondo luogo, la transizione da un intervento in acuto a un protocollo di condizionamento cronico rappresenta il passo successivo più significativo. Sarebbe infatti auspicabile valutare l'efficacia di un programma di *Motor Imagery* strutturato sul medio termine (della durata di quattro-sei settimane, con una frequenza di tre sedute settimanali) per verificare, tramite un apposito *post-test*, l'insorgenza di adattamenti plastici e neuromuscolari più profondi. Un approccio sul lungo periodo permetterebbe di osservare se i miglioramenti riscontrati nell'analisi univariata – nello specifico la riduzione del rapporto verticale – si consolidino in maniera ancora più marcata e, soprattutto, se tale stimolazione prolungata sia in grado di indurre una modificazione globale dei pattern locomotori. Ciò consentirebbe di estendere l'efficacia dell'allenamento mentale anche a quelle variabili biomeccaniche rimaste invariate dopo una singola sessione, portando auspicabilmente a una diversità cinetica e cinematica strutturale, intercettabile anche attraverso un'analisi multivariata complessiva.

4.2 Conclusioni

I risultati dello studio mostrano che, una singola seduta di immaginazione motoria è in grado di indurre un miglioramento significativo, seppur circoscritto, nel rapporto verticale su un campione di studenti universitari attivi. Sebbene tale variazione acuta non si sia tradotta in una differenza della biomeccanica globale tra il gruppo sperimentale e quello di controllo, suggerisce l'efficacia della *Motor Imagery* come strategia complementare per una immediata modulazione e ottimizzazione della tecnica di corsa.

5. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- Afrouzeh, M., Sohrabi, E., Haghkhan, A., Rowshani, F., & Goharrokhi, S. (2015). Effectiveness of PETTLEP imager on performance of passing skill in volleyball. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 55(1–2), 30–36.
- Barnes, K. R., & Kilding, A. E. (2015). Running economy: Measurement, norms, and determining factors. *Sports Medicine - Open*, 1(1), 8. <https://doi.org/10.1186/s40798-015-0007-y>
- Battaglia, C., D'Artibale, E., Fiorilli, G., Piazza, M., Tsopani, D., Giombini, A., Calcagno, G., & Di Cagno, A. (2014). Use of video observation and motor imagery on jumping performance in national rhythmic gymnastics athletes. *Human Movement Science*, 38, 225–234. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2014.10.001>
- Beaver, W. L., Wasserman, K., & Whipp, B. J. (1986). A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *Journal of Applied Physiology*, 60(6), 2020–2027. <https://doi.org/10.1152/jappl.1986.60.6.2020>
- Billat, V. L., Hill, D. W., Pinoteau, J., Petit, B., & Koralsztejn, J.-P. (1996). Effect of Protocol on Determination of Velocity at $\dot{V}O_2$ max and on its Time to Exhaustion. *Archives of Physiology and Biochemistry*, 104(3), 313–321. <https://doi.org/10.1076/apab.104.3.313.12908>
- Biomeccanica. (s.d.). In *Enciclopedia Treccani*. Istituto della Enciclopedia Italiana. Consultato il 28 giugno 2026, da <https://www.treccani.it/enciclopedia/biomeccanica/>
- Björkstrand, S., & Jern, P. (2013). Evaluation of an imagery intervention to improve penalty taking ability in soccer: A study of two junior girls teams. *Nordic Psychology*, 65(4), 290–305. <https://doi.org/10.1080/19012276.2013.851444>
- Cumming, J., & Ramsey, R. (2009). *Imagery interventions in sport*. Unpublished. <https://doi.org/10.13140/2.1.2619.2322>
- Folland, J. P., Allen, S. J., Black, M. I., Handsaker, J. C., & Forrester, S. E. (2017). Running Technique is an Important Component of Running Economy and Performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 49(7), 1412–1423. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001245>
- Fournier, J. F., Deremaux, S., & Bernier, M. (2008). Content, characteristics and function of mental images. *Psychology of Sport and Exercise*, 9(6), 734–748. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2007.12.003>
- Fusco, A., Iosa, M., Gallotta, M. C., Paolucci, S., Baldari, C., & Guidetti, L. (2014). Different performances in static and dynamic imagery and real locomotion. An exploratory trial. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00760>
- Gregg, M., Hall, C., & Butler, A. (2010). The MIQ-RS: A Suitable Option for Examining Movement Imagery Ability. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 7(2), 249–257. <https://doi.org/10.1093/ecam/nem170>
- Guillot, A., & Collet, C. (2005a). Contribution from neurophysiological and psychological methods to the study of motor imagery. *Brain Research Reviews*, 50(2), 387–397. <https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2005.09.004>
- Guillot, A., & Collet, C. (2005b). Duration of Mentally Simulated Movement: A Review. *Journal of Motor Behavior*, 37(1), 10–20. <https://doi.org/10.3200/JMBR.37.1.10-20>

- Guillot, A., Di Rienzo, F., & Collet, C. (2014). The Neurofunctional Architecture of Motor Imagery. In T. D. Papageorgiou, G. I. Christopoulos, & S. M. Smirnakis (A c. Di), *Advanced Brain Neuroimaging Topics in Health and Disease—Methods and Applications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/58270>
- Hanakawa, T., Dimyan, M. A., & Hallett, M. (2008). Motor planning, imagery, and execution in the distributed motor network: A time-course study with functional MRI. *Cerebral Cortex*, 18(12), 2775–2788. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhn036>
- Hardwick, R. M., Caspers, S., Eickhoff, S. B., & Swinnen, S. P. (2018). Neural correlates of action: Comparing meta-analyses of imagery, observation, and execution. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 94, 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2018.08.003>
- Hoogkamer, W., Kram, R., & Arellano, C. J. (2017). How Biomechanical Improvements in Running Economy Could Break the 2-hour Marathon Barrier. *Sports Medicine*, 47(9), 1739–1750. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0708-0>
- Iftikhar, M. T., Mallett, C. J., & Javed, M. A. (2018). Imagery Improves Reaction Time in Elite Sprinters: *Proceedings of the 6th International Congress on Sport Sciences Research and Technology Support*, 27–33. <https://doi.org/10.5220/0006898300270033>
- Jeannerod, M. «Mental Imagery in the Motor Context». *Neuropsychologia* 33, fasc. 11 (1995): 1419–32. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(95\)00073-c](https://doi.org/10.1016/0028-3932(95)00073-c).
- Kraeutner, S., Gionfriddo, A., Bardouille, T., & Boe, S. (2014). Motor imagery-based brain activity parallels that of motor execution: Evidence from magnetic source imaging of cortical oscillations. *Brain Research*, 1588, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2014.09.001>
- Lingvall, J., Milton, A., & Kallio, S. (2019). *THE IMPACT OF MOTOR IMAGERY ON SPORT PERFORMANCE AND THE BRAIN'S PLASTICITY* [Bachelor Degree Project in Cognitive Neuroscience, University of Skovde]. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1328632/FULLTEXT01.pdf>
- Lotze, M., & Halsband, U. (2006). Motor imagery. *Journal of Physiology, Paris*, 99(4–6), 386–395. <https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2006.03.012>
- Madan, C. R., & Singhal, A. (2013). Introducing TAMI: An Objective Test of Ability in Movement Imagery. *Journal of Motor Behavior*, 45(2), 153–166. <https://doi.org/10.1080/00222895.2013.763764>
- Miller, K. J., Schalk, G., Fetz, E. E., Den Nijs, M., Ojemann, J. G., & Rao, R. P. N. (2010). Cortical activity during motor execution, motor imagery, and imagery-based online feedback. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(9), 4430–4435. <https://doi.org/10.1073/pnas.0913697107>
- Mizuguchi, N., Nakata, H., Uchida, Y., & Kanosue, K. (2012). Motor imagery and sport performance. *The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine*, 1(1), 103–111. <https://doi.org/10.7600/jpfs.1.103>
- Moore, I. S. (2016). Is There an Economical Running Technique? A Review of Modifiable Biomechanical Factors Affecting Running Economy. *Sports Medicine*, 46(6), 793–807. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0474-4>
- Morone, G., Ghanbari Ghooshchy, S., Pulcini, C., Spangu, E., Zoccolotti, P., Martelli, M., Spitoni, G. F., Russo, V., Ciancarelli, I., Paolucci, S., & Iosa, M. (2022). Motor

- Imagery and Sport Performance: A Systematic Review on the PETTTLEP Model. *Applied Sciences*, 12(19), 9753. <https://doi.org/10.3390/app12199753>
- Nicholson, V. P., Keogh, J. W., & Low Choy, N. L. (2018). Can a single session of motor imagery promote motor learning of locomotion in older adults? A randomized controlled trial. *Clinical Interventions in Aging*, Volume 13, 713–722. <https://doi.org/10.2147/CIA.S164401>
- Olsson, C.-J., & Nyberg, L. (2010). Motor imagery: If you can't do it, you won't think it: Motor imagery. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20(5), 711–715. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2010.01101.x>
- Post, P., Young, G., & Simpson, D. (2018). The Effects of a PETTTLEP Imagery Intervention on Learners' Coincident Anticipation Timing Performance. *Journal of Applied Sport Psychology*, 30(2), 204–221. <https://doi.org/10.1080/10413200.2017.1363320>
- Riley, P. O., Dicharry, J., Franz, J., Croce, U. D., Wilder, R. P., & Kerrigan, D. C. (2008). A Kinematics and Kinetic Comparison of Overground and Treadmill Running. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 40(6), 1093–1100. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181677530>
- Roberts, R., Callow, N., Hardy, L., Markland, D., & Bringer, J. (2008). Movement Imagery Ability: Development and Assessment of a Revised Version of the Vividness of Movement Imagery Questionnaire. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 30(2), 200–221. <https://doi.org/10.1123/jsep.30.2.200>
- Rogers, R. G. (2006). Mental Practice and Acquisition of Motor Skills: Examples from Sports Training and Surgical Education. *Obstetrics and Gynecology Clinics of North America*, 33(2), 297–304. <https://doi.org/10.1016/j.ogc.2006.02.004>
- Sanno, M., Epro, G., Brüggemann, G.-P., & Willwacher, S. (2021). Running into Fatigue: The Effects of Footwear on Kinematics, Kinetics, and Energetics. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 53(6), 1217–1227. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002576>
- Schücker, L., & Parrington, L. (2019). Thinking about your running movement makes you less efficient: Attentional focus effects on running economy and kinematics. *Journal of Sports Sciences*, 37(6), 638–646. <https://doi.org/10.1080/02640414.2018.1522697>
- Scott, M. W., Wright, D. J., Smith, D., & Holmes, P. S. (2022). Twenty years of PETTTLEP imagery: An update and new direction for simulation-based training. *Asian Journal of Sport and Exercise Psychology*, 2(2), 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.ajsep.2022.07.002>
- Slawinski, J. S., & Billat, V. L. (2004). Difference in Mechanical and Energy Cost between Highly, Well, and Nontrained Runners: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 36(8), 1440–1446. <https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000135785.68760.96>
- Smith, C. P., Fullerton, E., Walton, L., Funnell, E., Pantazis, D., & Lugo, H. (2022). The validity and reliability of wearable devices for the measurement of vertical oscillation for running. *PLOS ONE*, 17(11), e0277810. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0277810>
- Tanji, F., Ohnuma, H., Ando, R., Yamanaka, R., Ikeda, T., & Suzuki, Y. (2024). Longer Ground Contact Time Is Related to a Superior Running Economy in Highly

- Trained Distance Runners. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 38(5), 985–990. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004737>
- Van Den Berghe, P., Derie, R., Gerlo, J., Bonnaerens, S., Fiers, P., Van Caekenberghe, I., De Clercq, D., & Segers, V. (2024). Learning effects in over-ground running gait retraining: A six-month follow-up of a quasi-randomized controlled trial. *Journal of Sports Sciences*, 42(6), 475–482. <https://doi.org/10.1080/02640414.2024.2323849>
- Van Hooren, B., Fuller, J. T., Buckley, J. D., Miller, J. R., Sewell, K., Rao, G., Barton, C., Bishop, C., & Willy, R. W. (2020). Is Motorized Treadmill Running Biomechanically Comparable to Overground Running? A Systematic Review and Meta-Analysis of Cross-Over Studies. *Sports Medicine*, 50(4), 785–813. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01237-z>
- Van Hooren, B., Jukic, I., Cox, M., Frenken, K. G., Bautista, I., & Moore, I. S. (2024). The Relationship Between Running Biomechanics and Running Economy: A Systematic Review and Meta-Analysis of Observational Studies. *Sports Medicine*, 54(5), 1269–1316. <https://doi.org/10.1007/s40279-024-01997-3>
- Wakefield, C., & Smith, D. (2012). Perfecting Practice: Applying the PETTLEP Model of Motor Imagery. *Journal of Sport Psychology in Action*, 3(1), 1–11. <https://doi.org/10.1080/21520704.2011.639853>
- Wilson, C., Smith, D., Burden, A., & Holmes, P. (2010). Participant-generated imagery scripts produce greater EMG activity and imagery ability. *European Journal of Sport Science*, 10(6), 417–425. <https://doi.org/10.1080/17461391003770491>
- Wright, C. J., & Smith, D. (2009). The effect of PETTLEP imagery on strength performance. *International Journal of Sport and Exercise Psychology*, 7(1), 18–31. <https://doi.org/10.1080/1612197X.2009.9671890>