



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE BIOMEDICHE E NEUROMOTORIE

CORSO DI LAUREA IN
FISIOTERAPIA

**IL RUOLO DEL TRAINING
NEUROMUSCOLARE NELLA RIABILITAZIONE
POST RICOSTRUZIONE DEL LEGAMENTO
CROCIATO ANTERIORE NEGLI ATLETI: UNA
REVISIONE SISTEMATICA DELLA
LETTERATURA**

Tesi di laurea in
Medicina Riabilitativa in Neurologia

Relatrice

Prof.ssa Maria Vittoria Filippi

Candidato

Lorenzo Dall'Agata

Sessione Novembre 2025

Anno Accademico 2024/2025

ABSTRACT

BACKGROUND: La lesione del legamento crociato anteriore (ACL) è un infortunio comune tra gli atleti, e ad oggi il trattamento d'elezione è la chirurgia di ricostruzione del legamento (ACLR). Gli outcome della riabilitazione post-chirurgica risultano spesso insoddisfacenti, con bassi livelli di *return to sport* (RTS), alti tassi di recidiva e deficit che permangono a lungo termine dopo la chirurgia.

OBIETTIVI: La presente revisione ha l'obiettivo di analizzare comparativamente le diverse tipologie di *neuromuscular training* (NMT) ed esplorarne l'efficacia nelle diverse fasi della riabilitazione post-ACLR negli atleti adulti, valutandone la rilevanza clinica.

METODI: La stesura di questa revisione sistematica segue le linee guida del *PRISMA 2020 Statement*. Le banche dati consultate sono PubMed, Cochrane Library e PEDro, e l'ultima ricerca è stata effettuata tra luglio e agosto 2025. Sono stati inclusi trial clinici randomizzati e controllati (RCT). La valutazione del rischio di bias è stata svolta tramite *PEDro scale*, e i risultati sono esposti per ciascuno studio e sintetizzati tramite tabella sinottica.

RISULTATI: Nella revisione sono stati inclusi 17 studi. Nelle fasi precoci la *cross education* può limitare l'inibizione di attivazione del quadricipite, mentre il training propriocettivo migliora la percezione articolare, ma necessita di essere integrato in protocolli più completi. L'allenamento pliometrico risulta il più efficace nel potenziare equilibrio, salto, simmetria e prontezza funzionale e psicologica per il ritorno allo sport.

DISCUSSIONE: La letteratura disponibile è eterogenea per modalità, timing e outcome di valutazione, riflettendo l'assenza di consenso sulle strategie riabilitative più efficaci. Il NMT rappresenta una componente essenziale della riabilitazione post-ACLR, tuttavia sono necessarie ricerche future maggiormente standardizzate, con follow-up a lungo termine e maggiore attenzione alle differenze di graft e di genere nella risposta riabilitativa.

INDICE

ABSTRACT	6
CAPITOLO 1: INTRODUZIONE	7
1.1: Razionale	7
1.2: Obiettivi.....	8
CAPITOLO 2: MATERIALI E METODI	9
2.1: Criteri di eleggibilità	9
2.2: Ricerca nelle banche dati.....	10
2.3: Selezione degli studi	12
2.4: Estrazione dei dati.....	12
2.5: Valutazione del rischio di bias.....	14
CAPITOLO 3: RISULTATI.....	15
3.1: Processo di selezione degli studi.....	15
3.2: Caratteristiche degli studi	16
NMT preoperatorio	16
Early phase NMT	17
Mid phase NMT	21
Late phase NMT.....	32
3.3: Rischio di bias degli studi	35
3.4: Risultati degli studi	36
NMT Preoperatorio	36
Early phase NMT	36
Mid phase NMT	39
Late phase NMT.....	45
3.5: Sintesi dei risultati.....	47

CAPITOLO 4: DISCUSSIONE	53
4.1: Interpretazione dei risultati	53
NMT preoperatorio	53
Early phase NMT	53
Mid phase NMT	55
Late phase NMT	58
4.2: Limiti delle evidenze	59
4.3: Limiti della revisione.....	60
4.4: Conclusioni e implicazioni cliniche.....	61
BIBLIOGRAFIA.....	63

CAPITOLO 1: INTRODUZIONE

1.1: Razionale

La lesione di ACL è uno infortunio molto comune, soprattutto nella giovane popolazione sportiva.^[1] Ad oggi, il gold standard per il trattamento di questa condizione è la ricostruzione chirurgica,^[2] nonostante evidenze recenti stiano aprendo nuove prospettive per il trattamento conservativo.^[3] Tuttavia gli outcome funzionali negli atleti che si sottopongono ad ACLR rimangono insoddisfacenti, con bassi livelli di RTS,^[4-7] alti tassi di recidiva^[8-11] e deficit che permangono a lungo termine dopo la chirurgia, come asimmetrie biomeccaniche,^[12,13] alterazioni propriocettive^[14,15] e importanti implicazioni psicologiche.^[16,17] È pertanto necessario approfondire le modalità riabilitative adottate, al fine di ottimizzare gli outcome funzionali dopo ACLR. Molte delle alterazioni che emergono post-ACLR riguardano l'aspetto neuromotorio, poiché l'ACL, oltre a svolgere un ruolo meccanico di stabilizzazione dell'articolazione del ginocchio, contribuisce anche alla stabilità neuromuscolare, integrando nel sistema sensomotorio i segnali propriocettivi provenienti dai numerosi meccanocettori contenuti nella sua struttura.^[18] Per questo motivo il NMT ha assunto nel tempo un ruolo sempre più centrale nella riabilitazione dell'ACL. Il NMT può essere definito come un insieme di esercizi finalizzati a potenziare le risposte motorie inconsce attraverso la stimolazione delle afferenze sensoriali e dei meccanismi centrali responsabili del controllo articolare dinamico. L'obiettivo principale di questo approccio è ottimizzare la capacità del sistema nervoso di reclutare le fibre muscolari in modo rapido ed efficiente, per incrementare la stabilità articolare dinamica, ridurre gli stress articolari e favorire il riapprendimento dei pattern motori.^[19] Il NMT volge quindi a instaurare una "prontezza" neuromuscolare che renda il soggetto in grado di rispondere alle situazioni dinamiche e alle perturbazioni in sicurezza, senza mettere a repentaglio le strutture articolari. Le tipologie di NMT sono molteplici e comprendono protocolli propriocettivi, di equilibrio, perturbativi, pliometrici, di controllo motorio, e, più recentemente, strategie di *cross education*. Queste modalità si differenziano per obiettivi, e meccanismi neurofisiologici sottesi, e la letteratura disponibile risulta eterogenea rispetto ai contesti di applicazione e agli outcome considerati. In particolare, sebbene numerosi RCT abbiano indagato

singole forme di NMT dopo lesione o ricostruzione di ACL, le evidenze appaiono disomogenee, sia per la varietà dei protocolli adottati che per la diversità degli outcome valutati (forza, simmetria, performance nei salti, RTS, propriocezione, prevenzione secondaria). Nonostante sia ampiamente riconosciuto il potenziale beneficio del NMT nel migliorare la funzione e nel ridurre il rischio di reinfortunio dopo ACLR, allo stato attuale delle conoscenze non emergono evidenze univoche riguardo a quale tipologia di NMT risulti più efficace né rispetto al timing della sua introduzione nelle diverse fasi riabilitative.

1.2: Obiettivi

La presente revisione sistematica mira a sintetizzare criticamente le evidenze provenienti da RCT che indagano l'efficacia dell'integrazione di diverse forme di NMT nel processo riabilitativo di soggetti adulti sportivi con lesione di ACL trattata chirurgicamente. L'obiettivo principale è valutarne l'efficacia nel migliorare la funzionalità articolare e neuromuscolare, favorire il RTS e ridurre il rischio di reinfortunio rispetto ai programmi standard. Il presente elaborato in conclusione volge ad analizzare comparativamente le diverse tipologie di NMT ed esplorarne l'efficacia nelle diverse fasi della riabilitazione.

CAPITOLO 2: MATERIALI E METODI

La presente revisione è stata condotta secondo le linee guida del *PRISMA 2020 statement*.^[20]

2.1: Criteri di eleggibilità

In questa revisione sistematica sono stati inclusi RCT e analisi secondarie dei suddetti con pubblicazione compresa dal principio dei database al 09/08/2025. Sono stati inclusi RCT che indagano l'efficacia di diverse tipologie di NMT dopo ACLR in atleti adulti, con particolare attenzione agli outcome funzionali, di performance neuromuscolare (es. forza muscolare, propriocezione, parametri cinematici) e al tasso di reinfortunio. I soggetti degli studi considerati sono atleti di tutti i livelli, adulti e di entrambi i sessi, che hanno subito ACLR isolata dopo lesioni sia traumatiche che atraumatiche. Sono stati inclusi articoli che avevano il NMT al centro dello studio e che lo analizzavano in modo isolato per indagarne l'effetto specifico. Per determinare l'inclusione in base al livello atletico sono stati seguiti i seguenti criteri: dichiarazione esplicita di popolazione atletica nello studio o, in assenza di questa, è stato preso in considerazione il *Tegner score* (se presente), includendo gli articoli che avevano una popolazione composta almeno all'80% da soggetti con *Tegner score* ≥ 6 . Sono stati esclusi i lavori che avevano il NMT come componente secondaria di protocolli composti da più linee di trattamento per evitare che i risultati potessero essere attribuiti ad altri interventi concomitanti. Sono stati esclusi gli articoli che consideravano popolazione non sportiva, pediatrica, anziana e i pazienti non trattati chirurgicamente. Un ulteriore criterio di esclusione è stata la presenza di patologie associate alla lesione di ACL, come patologie cardiorespiratorie, reumatologiche, neurologiche, metaboliche o psichiatriche.

2.2: Ricerca nelle banche dati

La ricerca nelle banche dati è stata svolta dal 01/04/2025 al 09/08/2025 secondo il seguente modello PICOS:

- P (Population): Athletes with ACL reconstruction
- I (Intervention): Neuromuscular training
- C (Comparison): Standard care
- O (Outcome): Functionality and reinjury rate
- S (Study design): Randomized Controlled Trial (RCT)

La ricerca è stata condotta nelle seguenti banche dati, generando una sequenza di stringhe col l'obiettivo di avere alta sensibilità: PubMed (ultima ricerca: 20 luglio 2025), Cochrane Library (ultima ricerca: 9 agosto 2025) e PEDro (ultima ricerca: 9 agosto 2025).

PubMed

Nel database PubMed è stata costruita una prima stringa ad aprile 2025, utilizzando le principali parole chiave del modello PICOS unite dagli operatori booleani:

("ACL injury"[Title/Abstract] OR "anterior cruciate ligament"[Title/Abstract]) AND ("neuromuscular training"[Title/Abstract] OR "motor control exercis"[Title/Abstract] OR proprioception[tiab] OR "motor control") AND ("randomized controlled trial"[Publication Type]) AND (adult[Filter]) AND (humans[Filter])*

39 risultati

La stringa iniziale tralasciava molti risultati che definivano il NMT con altri sinonimi o definizioni, di conseguenza è stata perfezionata con l'obiettivo di sensibilizzare al massimo la ricerca e comprendere l'eterogeneità degli approcci neuromuscolari presenti in letteratura. Inoltre, il filtro "*Publication Type*" è stato sostituito con formule più generiche, che comprendessero gli articoli che si definiscono RCT nel titolo o nell'abstract, con lo scopo di non perdere gli RCT che al momento della ricerca non erano ancora stati indicizzati come tali nel database. Non sono stati applicati filtri di età, di sesso, di lingua, temporali o di tipologia di pubblicazione. Le stringhe non includono

la parola “athletes” con lo scopo di mantenere alta la sensibilità della popolazione, dato che spesso il livello atletico non è dichiarato nel titolo e nell’abstract. Dopo una successione di 8 stringhe, progressivamente meglio definite in base a quanto sopra descritto, è stata applicata quella definitiva:

("anterior cruciate ligament"[tiab] OR ACL[tiab] OR "ACL injury"[tiab] OR "knee injury"[tiab] OR "anterior cruciate ligament injury"[tiab] OR "anterior cruciate ligament reconstruction"[tiab] OR "ACL-R"[tiab] OR "anterior cruciate ligament deficiency"[tiab] OR "ACL-D"[tiab]) AND ("neuromuscular training"[tiab] OR "motor control"[tiab] OR "proprioception"[tiab] OR "perturbation training"[tiab] OR "perturbation"[tiab] OR "neuromuscular exercise"[tiab] OR "NEMEX"[tiab] OR "agility training"[tiab] OR "balance training"[tiab] OR "balance exercise"[tiab] OR "suspension training"[tiab] OR "cross education"[tiab] OR "cross training" OR "core" OR "secondary prevention"[tiab] OR "reinjury"[tiab]) AND ("randomized controlled trial"[pt] OR randomized[tiab] OR RCT[tiab] OR trial[tiab] OR "randomized controlled trial"[tiab])

303 risultati

Sui risultati prodotti da tale stringa è stata effettuata la selezione finale degli articoli.

Cochrane Library

Nella banca dati Cochrane è stata utilizzata come base la medesima stringa, adattata per Cochrane, con il filtro “Trials”:

("anterior cruciate ligament" OR ACL OR "ACL injury" OR "anterior cruciate ligament injury" OR "anterior cruciate ligament reconstruction" OR "ACL-R" OR "anterior cruciate ligament deficiency" OR "ACL-D") AND ("neuromuscular training" OR "motor control" OR proprioception OR "perturbation training" OR perturbation OR "neuromuscular exercise" OR NEMEX OR "agility training" OR "balance training" OR "balance exercise") AND (randomized OR trial OR RCT)

220 risultati

PEDro

Nella banca dati PEDro l'indagine è stata svolta tramite ricerca avanzata con parole chiave, con il filtro "*clinical trial*":

"Neuromuscular training anterior cruciate ligament"

37 risultati

Oltre alle banche dati è stata analizzata la bibliografia degli articoli selezionati per individuare ulteriori pubblicazioni coerenti con il quesito dell'elaborato, non comprese con le ricerche nei database biomedici.

2.3: Selezione degli studi

La selezione degli studi dalle diverse fonti è avvenuta ad opera di un singolo revisore, tramite i processi di identificazione, screening, eleggibilità ed inclusione, considerando anche articoli inclusi da altre fonti esterne allo screening delle banche dati (citazioni e bibliografia). Il processo di identificazione è avvenuto tramite la formulazione delle stringhe di ricerca sopracitate e il loro impiego sulle banche dati biomediche. Dopo la prima ricerca sono stati rimossi i duplicati con l'assistenza del software AI Rayyan,^[21] con conferma manuale delle proposte suggerite dall'algoritmo. Il processo di screening è stato svolto tramite la lettura di titoli ed abstract degli articoli, valutandone l'eleggibilità. Dopo lo screening dei database biomedici gli articoli sono stati importati sul software Zotero^[22] per l'organizzazione e la lettura dei full text. Lo stesso programma è stato utilizzato per la gestione della bibliografia. Sono in seguito stati letti i *full text* degli articoli selezionati nello screening, valutando in modo definitivo la loro inclusione od esclusione nella presente revisione. Durante la lettura dei full text è stata approfondita la bibliografia di ciascuno, con lo scopo di includere articoli non reperiti mediante la ricerca nei database.

2.4: Estrazione dei dati

Dagli articoli selezionati sono stati estratti, mediante lettura dei *full text* per mano di un singolo revisore, i dati di interesse per la stesura di questo elaborato. In particolare, le principali variabili indagate ed estrapolate sono: nome dello studio, autori ed anno di pubblicazione, design dello studio e livello di cecità, popolazione esaminata,

randomizzazione e caratteristiche dei gruppi, tipologia di NMT, tempistiche di somministrazione dell'intervento fisioterapico (rispetto alla chirurgia e alla durata della riabilitazione) e gli outcome valutati con eventuali follow-up. Gli outcome riportati nei diversi articoli risultano eterogenei per tipologia e sono stati frequentemente utilizzati in differenti combinazioni; di conseguenza, non è stato possibile identificare in modo univoco un set di outcome primari da considerare nella presente revisione. Tuttavia, essi rientrano tutti all'interno delle categorie di outcome funzionali, di performance neuromuscolare (forza e/o propriocezione) o di tasso di reinfortunio, e per ciascun articolo sono quindi stati analizzati gli outcome indagati dagli autori. Con l'obiettivo di migliorare la fruibilità nel capitolo "Risultati" la presentazione dei lavori segue un criterio temporale: sono stati raggruppati in base alla fase della riabilitazione in cui è stato viene inserito il NMT. È stato applicato questo criterio in considerazione della variabilità degli obiettivi nel corso della riabilitazione. La definizione delle fasi della clinica è stata svolta seguendo le linee guida di Van Melick e collaboratori,^[23] che, in linea con le ultime evidenze, suggeriscono una progressione dettata da criteri clinici e da obiettivi specifici per passare alla fase successiva, piuttosto che da step temporali. Non tutti gli studi analizzati prevedevano criteri di inclusione clinici nella selezione dei soggetti. In tali studi, in cui il criterio di selezione era prevalentemente temporale, l'assegnazione alle diverse fasi è stata eseguita seguendo gli obiettivi esplicitati del NMT proposto o, in assenza anche di questi ultimi, secondo un criterio temporale assunto per convenzione, che punta a tenere in conto gli step clinici proposti da Van Melick, considerando quando verosimilmente in clinica vengono raggiunti gli obiettivi di ciascuna fase:

- preoperatoria: prima dell'intervento
- *Early phase*: 0-6 settimane
- *Mid phase*: 2-7 mesi
- *Late phase*: 7-12 mesi

Nella trattazione delle varie fasi gli articoli sono disposti in ordine cronologico di pubblicazione. Le caratteristiche ed i risultati dei singoli studi sono esposti in modo completo nel corso del Capitolo 3 e sintetizzati nella Tabella II.

2.5: Valutazione del rischio di bias

Il rischio di bias dei singoli studi è stato valutato tramite la *PEDro scale*. È validata in italiano e rappresenta uno strumento affidabile per l'analisi della qualità metodologica degli studi clinici e l'identificazione di potenziali fonti di bias. La scala si avvale di 11 domande riguardanti lo studio con risposta binaria, e dipendentemente dalle risposte ai singoli quesiti viene assegnato un punteggio da 0 a 10 allo studio (il primo item non influisce direttamente sul punteggio), dove 10 corrisponde ad ottima qualità metodologica e 0 ad una qualità molto bassa. Di seguito la scala ufficiale in italiano reperibile dal database PEDro (<https://pedro.org.au/italian/resources/pedro-scale/>).

PEDro scale per il rischio di bias

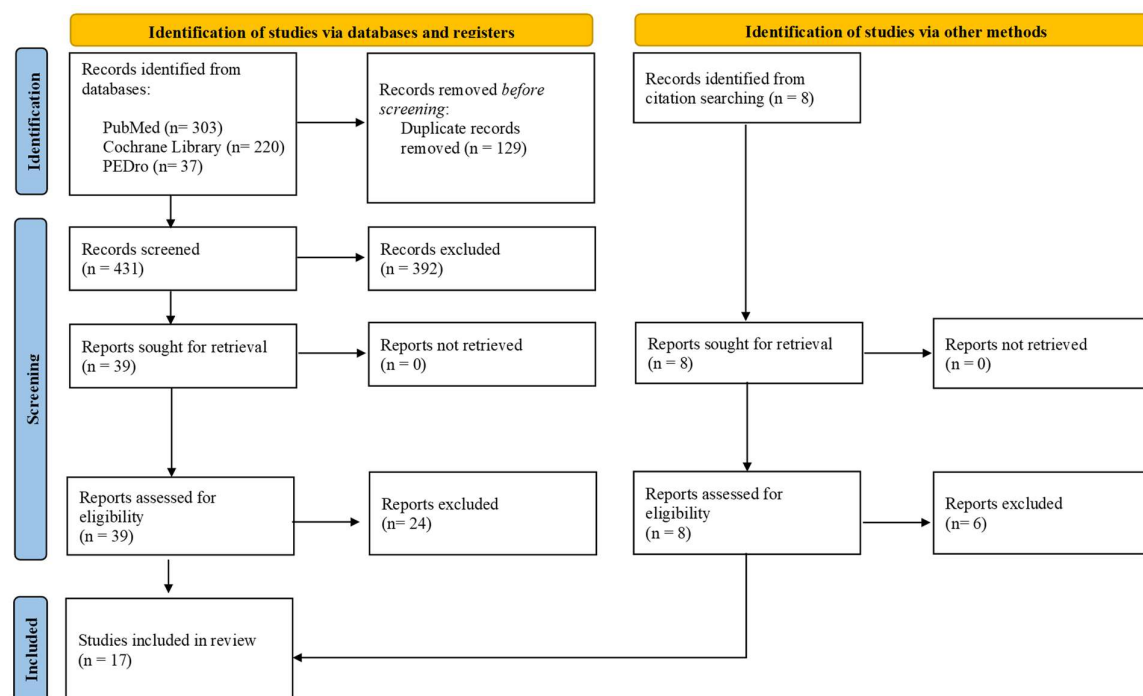
1. I criteri di eleggibilità sono stati specificati?
2. I soggetti sono stati assegnati in maniera randomizzata ai gruppi? (negli studi crossover, è randomizzato l'ordine con cui i soggetti ricevono il trattamento?)
3. L'assegnazione dei soggetti era nascosta?
4. I gruppi erano simili all'inizio dello studio per quanto riguarda i più importanti indicatori prognostici?
5. Tutti i soggetti erano "ciechi" rispetto al trattamento?
6. Tutti i terapisti erano "ciechi" rispetto al tipo di trattamento somministrato?
7. Tutti i valutatori erano "ciechi" rispetto ad almeno uno degli obiettivi principali dello studio?
8. I risultati di almeno un obiettivo dello studio sono stati ottenuti in più dell'85% dei soggetti inizialmente assegnati ai gruppi?
9. Tutti i soggetti analizzati al termine dello studio hanno ricevuto il trattamento (sperimentale o di controllo) cui erano stati assegnati oppure, se non è stato così, i dati di almeno uno degli obiettivi principali sono stati analizzati per "intenzione al trattamento"?
10. I risultati della comparazione statistica tra i gruppi sono riportati per almeno uno degli obiettivi principali?
11. Lo studio fornisce sia misure di grandezza che di variabilità per almeno uno degli obiettivi principali?

CAPITOLO 3: RISULTATI

3.1: Processo di selezione degli studi

I metodi di selezione sono esposti nel dettaglio nel Capitolo 2, nel paragrafo 2.3. La consultazione delle banche dati ha restituito rispettivamente: da PubMed 303 risultati, da Cochrane Library 220 risultati e da PEDro 37 risultati, per un totale di 560 articoli identificati con la ricerca tramite stringhe (PubMed e Cochrane) e parole chiave (PEDro). L'individuazione dei duplicati tramite Rayyan e conferma manuale ha condotto all'eliminazione di 129 pubblicazioni, con successivo screening dei restanti 431 articoli. Questa analisi di titoli ed abstract ha portato all'esclusione di 392 lavori per i criteri di esclusione esplicitati nel Capitolo 2, di conseguenza all'identificazione di 39 articoli eleggibili, di cui sono stati reperiti tutti i *full text*. La lettura integrale dei testi ha restituito la conferma di inclusione di 15 articoli, escludendone 24. Parallelamente alla lettura dei *full text* è stata analizzata nel dettaglio la bibliografia di ciascun paper, permettendo di identificare 8 ulteriori articoli da considerare eleggibili. Di questi, 2 rispettavano i criteri di eleggibilità predefiniti, dunque sono stati inclusi nella revisione. Gli studi inclusi sono in conclusione 17, di cui 12 studi e 5 analisi secondarie.

Figura I - PRISMA Flow Diagram



3.2: Caratteristiche degli studi

I seguenti studi sono tutti RCT e hanno in comune come criterio di inclusione lesione isolata di ACL senza associato danno severo condrale, meniscale e legamentoso (di altre strutture a parte ACL).

NMT preoperatorio

Perturbation Training prior to ACL Reconstruction Improves Gait Asymmetries in Non-Copers - Hartigan et al. 2008 ^[24]

Si tratta di un RCT che indaga l'effetto del perturbation training preoperatorio sulla simmetria del cammino post-operatoria. I criteri di inclusione dello studio prevedevano che i pazienti avessero età compresa tra 17 e 50 anni e che prima dell'infortunio fossero partecipanti di attività di livello I o II e che fossero stati classificati come non-copers. Sono stati inclusi 19 soggetti (M=13 e F=6) randomizzati in due gruppi: un gruppo di Strength e un gruppo di Perturbation. Il gruppo Perturbation era composto da 5 uomini e 3 donne con età media $28 \pm 10,7$ anni e con un intervallo medio di $9,8 \pm 9,5$ settimane dal trauma alla valutazione di screening. Il gruppo Strength includeva 7 uomini e 3 donne di età media $30 \pm 9,4$ anni e con un intervallo medio di $12,6 \pm 13,1$ settimane dal trauma. Il gruppo Strength ha ricevuto 10 sedute di rinforzo progressivo del quadricipite (durata media 3,1 settimane). Il gruppo Perturbation ha ricevuto 10 sedute di fisioterapia comprendenti esercizi neuromuscolari specifici basati su traslazioni della superficie di appoggio e rinforzo progressivo del quadricipite (durata media 3,7 settimane). Al termine del trattamento sono stati operati con autograft hamstring (HT) o con allograft. Gli outcome valutati sono la forza isometrica di quadricipite, valutata tramite dinamometro e l'escursione articolare del ginocchio durante la *mid-stance* del cammino, valutata tramite un sistema di analisi del movimento. Entrambe le variabili sono state valutate prima della riabilitazione preoperatoria e 6 mesi dopo l'intervento, periodo durante il quale i soggetti hanno svolto la medesima riabilitazione post-chirurgica. Sul campione è stata svolta una analisi *per protocol*. Lo studio non presenta aperte dichiarazioni di limitazioni dello studio, tuttavia suggerisce la necessità di ulteriori studi con supporto elettromiografico.

Early phase NMT

Cross training

Cross-education does not accelerate the rehabilitation of neuromuscular functions after ACL reconstruction: a randomized controlled clinical trial – Zult et al. 2018 [25]

Questo articolo è un RCT che indaga se la *cross education*, come trattamento aggiuntivo alla riabilitazione standard, possa accelerare il recupero della forza del quadricipite e della funzione neuromuscolare fino a 26 settimane dopo l'intervento chirurgico. I criteri di inclusione prevedevano età compresa tra 18 e 60 anni, atleti ricreativi, con lesione di ACL unilaterale con o senza parziale lesione meniscale ricostruita con graft di ogni tipologia. Sono stati esclusi pazienti con precedenti lesioni di ACL, con altri infortuni agli arti inferiori e con un tempo intercorso fra l'infortunio e la chirurgia superiore ai 2 anni. I partecipanti inclusi sono stati 55, ma considerando i 12 dropout avvenuti nel corso della sperimentazione nell'analisi finale sono stati inclusi 43 soggetti. Sono stati randomizzati in due gruppi: Experimental group con 22 soggetti di età media 28 ± 9 anni di cui 16 maschi e 6 femmine con un *Tegner score* medio di 8 ± 2 , e Control group con 21 soggetti di età media 28 ± 10 anni, di cui 8 maschi e 14 femmine con *Tegner score* medio di 7 ± 2 . Entrambi i gruppi hanno svolto un programma di fisioterapia standard per 26 settimane dopo la chirurgia con progressione da controllo del dolore e del gonfiore a training di potenza e corsa nelle ultime settimane, il gruppo Experimental in aggiunta ha eseguito un protocollo di rinforzo del quadricipite dell'arto non operato per le prime 12 settimane di trattamento. Il programma di *cross education* prevedeva che in tutte le sedute (2 volte a settimana) i soggetti svolgessero leg extension e leg press a 8-12 ripetizioni per 3 set, con focus sulla componente concentrica del gesto. L'outcome primario valutato è la *maximal voluntary contraction* (MVC), misurato tramite dinamometro isocinetico, svolgendo 2 ripetizioni di familiarizzazione e tre di effettiva misurazione. Gli outcome secondari sono: contrazione volontaria del quadricipite misurata tramite elettrodi, precisione di forza del quadricipite misurata tramite il dinamometro isocinetico, propriocezione valutata tramite riposizionamento dell'articolazione a diversi angoli ed equilibrio su una gamba, misurato staticamente tramite cronometraggio del tempo in equilibrio su una gamba con un massimo di 60s e

in modo dinamico tramite *star excursion balance test* (SEBT). I pazienti sono stati testati per i vari outcome a 5, 12 e 26 settimane. L'analisi è stata condotta secondo un approccio di *modified intention-to-treat*, escludendo coloro che non hanno partecipato ad almeno 2 sedute di test. Eventuali differenze iniziali tra i gruppi sono state prese in considerazione nel modello di analisi, in modo che i risultati finali non fossero condizionati da tali disomogeneità. Gli autori hanno dichiarato i seguenti limiti: distribuzione sbilanciata dei sessi nei gruppi, differente modalità di contrazione fra training e test e assenza di misure neurofisiologiche.

Contralateral strength training attenuates muscle performance loss following anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction: a randomised-controlled trial – Minshull et al. 2021 [26]

Lo studio in considerazione è un RCT, l'obiettivo dichiarato è quello di indagare gli effetti dell'esercizio di *cross education* sulla forza e sulla performance a 10 e 24 settimane dall'ACLR. I criteri di inclusione dei partecipanti prevedevano che fossero atleti ricreativi di età compresa fra 15 e 50 anni con lesione isolata di ACL operata chirurgicamente con vari tipi di graft, senza patologie associate. In totale sono stati arruolati 44 soggetti, randomizzati in due gruppi: Cross Education (CE) comprendente 22 pazienti con età media di 33.3 ± 10.0 anni, di cui 15 maschi e 7 femmine, e Control (CON) con 22 individui di età media 30.4 ± 9.4 anni, comprendenti 10 maschi e 12 femmine. I tipi di graft erano distribuiti come segue: gruppo CE con 12 graft *bone-patellar tendon-bone* (BTB) (di cui 2 revisioni) e 10 graft HT, mentre il gruppo CON era composto da 11 graft BTB (di cui 3 revisioni), 10 graft HT e 1 graft rotuleo (QT). Il gruppo CE prevedeva una progressione standard post-ACLR associata ad un protocollo di rinforzo dell'arto non operato, inserito 2 settimane dopo la chirurgia, svolto 3 volte a settimana per 8 settimane, solo 1 delle 3 sessioni settimanali era supervisionata. Il programma prevedeva 3 set composti da 3-5 ripetizioni ciascuno di estensioni di ginocchio, *hamstring curls* e leg press, con carichi monitorati settimanalmente e con progressione graduale. Il gruppo di controllo svolgeva la fisioterapia standard al pari del gruppo sperimentale, ma in aggiunta al posto della *cross education* prevedeva degli esercizi *sham* di stretching degli arti superiori, con 3 set da 20 secondi per i principali

gruppi muscolari del comparto superiore. La scelta di aggiungere esercizi *sham* al gruppo di controllo è volta a controllare i potenziali bias derivanti dall'attenzione supplementare del fisioterapista, e sono stati applicati all'arto superiore per evitare possibili effetti di trasferimento sulle prestazioni muscolari dell'arto inferiore. Gli autori hanno indagato l'effetto dell'intervento su outcome primari e secondari. Per tutte le variabili considerate le misure alla baseline sono state prese entro 6 settimane prima della chirurgia. L'outcome primario è la *quadriceps peak force* (QPF), testato a 10 settimane dall'intervento. Gli outcome secondari sono la QPF e l'*hop for distance* a 24 settimane e l'*hamstring peak force* (HPF), il *rate of force development* (RFD) e l'*International Knee Documentation Committee Score* (IKDC) a 10 e 24 settimane. Sulla base dei risultati del QPF, HPF e *hop for distance* è stato calcolato l'*inter limb symmetry* (ILS). Il QPF, l'HPF e l'RFD sono stati testati tramite un dinamometro costruito ad hoc. Vista la disparità nella distribuzione del sesso nei due gruppi sono stati calcolati i valori corretti in base al sesso. Lo studio ha adottato un'analisi *per-protocol*. Gli autori come limite dello studio individuano l'assenza di monitoraggio elettromiografico.

The Effect of Contralateral Knee Neuromuscular Exercises on Static and Dynamic Balance, Knee Function, and Pain in Athletes Who Underwent Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Single-Blind Randomized Controlled Trial – Karimijashni et al. 2023 [27]

Questo studio è un RCT in singolo cieco che si pone lo scopo di studiare gli effetti del *cross training* neuromuscolare post-chirurgico sull'equilibrio, la funzionalità e il dolore. Lo studio ha arruolato 30 atleti di sesso maschile di età compresa fra 18 e 40 anni con lesione isolata di ACL nell'arto non dominante, ricostruito chirurgicamente con graft HT o allograft. Altri criteri di inclusione prevedevano che i pazienti fossero atleti ricreativi con attività sistematica almeno 2 volte a settimana e che non avessero lesioni o patologia associate. I 30 soggetti sono stati randomizzati in due gruppi: il gruppo Intervention con 15 partecipanti con una media di età di 27.8 ± 4.76 anni e il gruppo Control con 15 individui con età media di 27.2 ± 4.48 anni. Entrambi i gruppi hanno ricevuto nelle prime 8 settimane post-intervento fisioterapia standard, composta da progressivo rinforzo del quadricipite, il gruppo Intervention in aggiunta ha ricevuto

NMT dell'arto non operato. Gli esercizi neuromuscolari sono iniziati dalla prima settimana post-intervento, con una frequenza di 4 sessioni a settimana per 8 settimane, ciascuna della durata di 30 minuti. Nella prima settimana i pazienti hanno eseguito esercizi di equilibrio monopodalico sull'arto non operato su superficie stabile, sia a occhi aperti che chiusi. Nella seconda settimana sono stati introdotti esercizi per gli arti superiori con palla e TheraBand, comprendenti lanci in varie direzioni, schemi di *Proprioceptive Neuromuscular Facilitation* e mini-squat monopodali. Tra la terza e la quarta settimana la difficoltà è stata incrementata utilizzando superfici instabili in gommapiuma, mantenendo le stesse varianti di equilibrio ed esercizi per gli arti superiori. Dalla quinta all'ottava settimana l'allenamento è proseguito con superfici ancora più instabili, come le tavolette propriocettive, sempre in associazione agli esercizi con gli arti superiori. La progressione è stata adattata individualmente nel corso delle settimane. Gli outcome valutati sono divisi in outcome primari e outcome secondari. Gli outcome primari sono il SEBT, *Stork Stance Balance Test*, *Balance error scoring system* (BESS) *test*, e la *Lysholm Knee Scoring Scale* (LKS), mentre l'outcome secondario è la *Visual Analogue Scale* (VAS). Tutti i pazienti di entrambi i gruppi sono stati valutati 1 settimana prima della chirurgia e 8 settimane dopo questa. Non ci sono stati dropout nel corso dello studio. Gli autori individuano i seguenti limiti: assenza di follow-up a lungo termine, eterogeneità del campione, composizione esclusivamente maschile con determinati graft e assenza di misurazioni con alta sensibilità.

Mid phase NMT

ACL-SPORTS trial

ACL-SPORTS (*Anterior Cruciate Ligament-Specialized Post-Operative Return to Sports*) trial si tratta di un RCT il cui protocollo è stato proposto da White e collaboratori nel 2013.^[28] Da questo trial sono seguite diverse pubblicazioni secondarie che analizzano sottogruppi della popolazione originale e/o specifici outcome a determinati periodi di follow-up. Di seguito saranno esposte le caratteristiche generali comuni, derivanti dal protocollo di White et al. e della popolazione completa, e successivamente saranno descritti uno ad uno in ordine cronologico di pubblicazione. Il protocollo è tratto da White et al. 2013 mentre i dati demografici e le caratteristiche di popolazione (comuni a tutte le pubblicazioni) derivano dal primo trial pubblicato di Arundale et al. 2017.^[29]

Si tratta di un RCT in singolo cieco con l'obiettivo di determinare gli effetti del programma di training ACL-SPORTS sul carico articolare, sulla biomeccanica e sulle misure cliniche e funzionali di atleti di livello I e II dopo ACLR. I ricercatori incaricati della raccolta, registrazione e analisi dei dati erano ciechi rispetto all'assegnazione dei partecipanti ai gruppi, così come il ricercatore principale e il biostatistico. Al contrario, il fisioterapista e il paziente non erano ciechi rispetto all'assegnazione al gruppo di trattamento. Il protocollo prevedeva la partecipazione di 80 atleti con i seguenti criteri di eleggibilità: atleti di livello I e II con intenzione di tornare allo sport di cui 40 uomini e 40 donne di età compresa tra 13 e 55 anni con ACLR isolata. Altri criteri di inclusione prevedevano che gli atleti fossero a più di 12 settimane dall'intervento con un *quadriceps index* (QI) dell'80% e con minimo versamento. Sono stati esclusi dallo studio coloro che non partecipavano ad attività sportiva ai livelli richiesti, che avevano già subito ACLR, con storico di altre lesioni gravi o con difetti osteocondrali maggiori di 1cm² e coloro per cui erano trascorsi più di 10 mesi dall'intervento chirurgico. La randomizzazione degli inclusi è avvenuta con stratificazione per sesso, distribuendo i partecipanti equamente su due gruppi: il gruppo SAP+PERT composto da 40 individui di cui 20 maschi e 20 femmine e il gruppo SAP con la stessa composizione. Il protocollo prevedeva un training di 10 sessioni supervisionate distribuite su 5 settimane, iniziando come prevedevano i criteri di inclusione fra i 3 e i 9 mesi dalla chirurgia a seconda del

raggiungimento dei criteri richiesti. Tutti i partecipanti, indipendentemente dal gruppo di assegnazione, eseguivano il programma SAP (*strengthening, agility, and secondary prevention*) con esercizi di rinforzo di quadricipite, hamstring e abduttori d'anca, esercizi su atterraggi, pliometrie e salti e una componente di *agility* con cambi di direzioni e corsa. Tutte le componenti del programma hanno subito una progressione nel corso delle settimane, la cui sicurezza ed eventuale inserimento erano a discrezione dei fisioterapisti che supervisionavano la seduta. Il gruppo sperimentale SAP+PERT prevedeva che in aggiunta alla progressione standard (SAP) fosse inserito anche il *perturbation training*, con esercizi su superfici instabili con perturbazioni multidirezionali applicate dal fisioterapista, con graduale aumento di ampiezza e velocità e con inserimento di compiti cognitivi. Gli outcome primari valutati sono stati: la biomeccanica del cammino, QI, hop test, questionari soggettivi e *Knee joint loading*. Mentre gli outcome secondari erano il tasso di RTS, il tasso di reinfortunio e i pattern elettromiografici di attivazione muscolare. Tutti i test sono stati condotti prima del programma di riabilitazione, subito dopo la sua conclusione, ad 1 anno dalla chirurgia e dopo 2 anni dalla chirurgia. Sul campione è stata svolta una analisi *per protocol*.

Report of the Clinical and Functional Primary Outcomes in Men of the ACL-SPORTS Trial: Similar Outcomes in Men Receiving Secondary Prevention With and Without Perturbation Training 1 and 2 Years After ACL Reconstruction – Arundale et al. 2017
[29]

Questo articolo è la prima pubblicazione sui risultati dell'ACL-SPORTS trial. Considera solamente la parte maschile del trial. I 40 uomini considerati sono stati randomizzati in due gruppi, quello di controllo SAP con età media di 24 ± 9 anni, cui 14 ricostruiti con autograft e 6 con allograft e quello sperimentale SAP+PERT con età media di 23 ± 6 anni, di cui 13 ricostruiti con autograft e 7 con allograft. Di tutti gli outcome citati in White et al. questo studio analizza il QI, gli hop test, i questionari soggettivi e il tasso di RTS. Gli autori dichiarano i seguenti limiti: campione di soli uomini quindi non generalizzabile a tutta la popolazione (dichiarano che studi futuri avrebbero incluso le donne), campione ridotto di soli atleti quindi non generalizzabile ad altre popolazioni.

Report of the Primary Outcomes for Gait Mechanics in Men of the ACL-SPORTS Trial: Secondary Prevention With and Without Perturbation Training Does Not Restore Gait Symmetry in Men 1 or 2 Years After ACL Reconstruction – Capin et al. 2017 ^[30]

Questo articolo prende in considerazione gli effetti del *perturbation training* sulla biomeccanica del cammino valutata tramite *3D motion capture*. La popolazione considerata è la componente maschile dell'ACL-SPORTS trial, le cui caratteristiche sono state esposte nello studio precedente. Le variabili del cammino studiate comprendevano gli angoli e i momenti articolari di anca e ginocchio sui piani sagittale e frontale, valutati nei momenti di picco di flessione (pKFA) e picco di estensione del ginocchio (pKExtA), nonché le escursioni articolari sul piano sagittale durante la fase di accettazione del carico (pKFA al contatto iniziale) e la fase intermedia d'appoggio (*midstance*, pKExtA e pKFA). I pazienti sono stati testati subito dopo la terapia, a 1 anno e a 2 anni dalla chirurgia. Gli autori riportano i seguenti limiti: campione di soli uomini quindi non generalizzabile a tutta la popolazione (dichiarano che studi futuri avrebbero incluso le donne), mancata standardizzazione della tecnica chirurgica e l'assenza di analisi elettromiografiche.

Two year ACL reinjury rate of 2.5%: outcomes report of the men in a secondary ACL injury prevention program (ACL-SPORTS) – Arundale et al. 2018 ^[31]

Questa analisi secondaria dell'ACL-SPORTS trial analizza alcuni outcome previsti da White et al. nella popolazione maschile dello studio. Sono stati presi in considerazione: la tempistica e la percentuale di RTS, il ritorno al livello pre-infortunio e l'incidenza di re-infortunio a 1 e 2 anni dopo l'ACLR. Perché un soggetto fosse considerato idoneo per il RTS era necessario raggiungesse i seguenti obiettivi: $\geq 90\%$ LSI nella forza di quadricipite, $\geq 90\%$ LSI negli hop test e $\geq 90\%$ nei questionari soggettivi. I dati sono stati raccolti dopo la riabilitazione, ad un anno e a due anni dalla chirurgia. Tutti i 40 soggetti sono stati inclusi nell'analisi di questi risultati, senza dropout. Gli autori riportano i seguenti limiti: campione di soli uomini quindi non generalizzabile a tutta la popolazione (dichiarano che studi futuri avrebbero incluso le donne) e RTS auto riferito dagli atleti senza misure di esposizione.

Functional and Patient-Reported Outcomes Improve Over the Course of Rehabilitation: A Secondary Analysis of the ACL-SPORTS Trial – Arundale et al. 2018 ^[32]

Si tratta di una revisione secondaria che approfondisce outcome funzionali e soggettivi tramite la somministrazione di questionari, i *patient reported outcomes* (PROs), alla totalità del campione dell'ACL-SPORTS. I PROs sono stati compilati dai pazienti solo pre e post training. La popolazione totale era composta da 79 soggetti di cui 40 uomini e 29 donne randomizzati in due gruppi con stratificazione per sesso: gruppo SAP+PERT composto da 20 uomini e 19 donne con età media 21.1 ± 7.6 anni con ACLR tramite 31 autograft e 8 allograft, e il gruppo SAP con 20 uomini e 20 donne con età media 21.2 ± 7.7 anni, con 30 autograft e 10 allograft. Gli outcome considerati in questo studio sono stati la forza muscolare misurata in termini di QI, la performance funzionale analizzata tramite diversi hop test (*Single hop for distance*, *Crossover hop for distance*, *Triple hop for distance* e *6-meter timed hop*) e alcuni PROs come il *Knee Outcome Survey Activities of Daily Living Scale* (KOS-ADLS), IKDC, *Knee Injury and Osteoarthritis Outcome score* (KOOS) e altri. Le analisi sono state svolte sul campione in toto e formulando confronti tra i due gruppi randomizzati e tra uomini e donne del campione. Questa scelta dello scioglimento dei gruppi nelle analisi è dipesa dalla mancanza di differenza tra i due gruppi randomizzati. Questa pubblicazione prevede una sola valutazione subito dopo l'intervento senza ulteriori follow-up, e non ci sono stati dropout in questo periodo di sperimentazione. Gli autori hanno dichiarato i seguenti limiti per questo studio: il valore del QI è stato utilizzato sia come criterio di inclusione che, come outcome, non c'è stato controllo totale sulle attività casalinghe dei soggetti.

Superior 2-Year Functional Outcomes Among Young Female Athletes After ACL Reconstruction in 10 Return-to-Sport Training Sessions – Capin et al. 2019 ^[33]

Questo articolo indaga gli outcome funzionali nella popolazione femminile del ACL-SPORTS trial. Comprende anche una parte di confronto con la coorte di un altro studio, che in questa revisione non è stata considerata. La popolazione analizzata comprendeva 39 donne randomizzate come segue: SAP+PERT composto da 19 soggetti e il gruppo SAP con 20 soggetti. Non vengono fornite altre informazioni sui gruppi, ma le informazioni sono reperibili dallo studio analizzato in seguito. Gli outcome considerati

sono stati: la forza muscolare misurata in termini di QI, la performance funzionale analizzata tramite diversi hop test (*Single hop for distance*, *Crossover hop for distance*, *Triple hop for distance* e *6-meter timed hop*), alcuni PROs come il KOS-ADLS, IKDC, KOOS (e altri), il tasso di RTS e l'incidenza di recidive. Le pazienti sono state testate post training, ad 1 anno e a 2 anni dalla chirurgia. I limiti considerati dagli autori includono la scarsa omogeneità del campione, che ne riduce la generalizzabilità, e la mancanza di dati preoperatori su motivazione e funzione.

A Secondary Injury Prevention Program May Decrease Contralateral Anterior Cruciate Ligament Injuries in Female Athletes: 2-Year Injury Rates in the ACLSPORTS Randomized Controlled Trial – Johnson et al. 2020 ^[34]

Questo articolo indaga l'effetto del *perturbation training* sul tasso di recidive in giovani atlete. Comprende la componente femminile dell'ACL-SPORTS trial: 39 donne randomizzate in due gruppi: gruppo SAP+PERT composto da 19 donne di età media 19 ± 8.8 anni, di cui 8 operate con autograft HT, 10 HT e 1 allograft, e il gruppo SAP con 20 donne di età media 18.9 ± 5.8 anni, di cui 8 operato con autograft HT, 8 con HT e 4 con allograft. Prima del RTS le atlete dovevano aver raggiunto i seguenti requisiti minimi: $\geq 90\%$ LSI nella forza di quadricipite, $\geq 90\%$ LSI negli hop test e $\geq 90\%$ nei PROs. Le pazienti sono state suddivise anche in tre gruppi a seconda della fascia di età vista l'influenza di quest'ultima sulla probabilità di recidiva: età $<18y$ ($n=26$), $<20y$ ($n=32$) e $<25y$ ($n=35$). L'outcome primario considerato era l'incidenza delle recidive di lesione di ACL e la distanza di questa dal RTS, sia del graft che del controlaterale. Il follow-up è stato condotto fino a due anni dall'intervento o fino a lesione di ACL. Questo studio non ha visto dropout in nessuna fase dei follow-up. Gli autori dichiarano le seguenti limitazioni: RTS autoriferito, follow-up limitato a due anni e campione ridotto.

La trattazione delle caratteristiche dell'ACL-SPORTS trial si conclude con questo articolo. In letteratura è reperibile un'ulteriore analisi secondaria (Zarzycki et al. 2021)^[35], ma tratta l'associazione della risposta psicologica ai questionari di valutazione soggettiva, di conseguenza, non rispettando il quesito, non è stato incluso nel presente elaborato.

Altri articoli mid phase

The effects of proprioceptive or strength training on the neuromuscular function of the ACL reconstructed knee: a randomized clinical trial – Liu-Ambrose et al. 2002 ^[36]

Si tratta di un RCT che si pone l'obiettivo di determinare gli effetti di un training propriocettivo paragonato ad un training di forza sulla funzione neuromuscolare dopo ACLR. I criteri di inclusione richiedevano che i pazienti avessero età compresa tra 18 e 38 anni con ACLR unilaterale. Inoltre, dovevano essere trascorsi almeno 6 mesi dall'intervento e dovevano avere *range of motion* (ROM) completo, assenza di dolore e gonfiore anche dopo attività leggere (camminare, bicicletta o nuotare) e quotidiane. Sono stati esclusi pazienti con infortuni o patologie concomitanti e quelli per cui non erano ancora trascorsi 6 mesi dall'intervento. In totale sono stati inclusi 10 soggetti, tutti atleti secondo il *Tegner score* riportato e operati con autograft di semitendinoso, e sono stati randomizzati in due gruppi: il gruppo Strength (ST) composto da 5 soggetti, 3 maschi e 2 femmine con età media 24.7 ± 2.7 anni e *Tegner score* medio pre infortunio di 8.6 ± 1.1 e il gruppo Proprioceptive (PT) con 5 partecipanti, 1 maschio e 4 femmine, di età media 25 ± 3.7 anni e *Tegner score* medio di 8.8 ± 1.1 . Dopo lo svolgimento delle misurazioni alla baseline i pazienti hanno iniziato i rispettivi training, dalla durata complessiva di 12 settimane con una frequenza di 3 volte a settimana. Il gruppo ST ha svolto un lavoro progressivo di rinforzo con graduale aumento dei carichi, mentre il gruppo PT ha seguito un protocollo propriocettivo basato su esercizi di equilibrio, agilità e perturbazioni con incremento della difficoltà tramite riduzione della base di appoggi, riduzione della stabilità delle superfici, aumento della velocità e delle ripetizioni e rimozione del feedback visivo. Gli outcome analizzati comprendevano misurazioni della forza muscolare tramite *average torque* di quadricipite ed hamstring e *peak torque time* (PeakTT) degli hamstring, funzione del ginocchio tramite hop test di vario tipo e questionari soggettivi per valutare la percezione del ginocchio, come LKS e *Tegner score*. Le valutazioni sono state effettuate pre-training, alla sesta settimana del training (solamente il PeakTT) e post-training entro 7 giorni dalla fine del programma. Non ci sono stati dropout durante la sperimentazione. I limiti dichiarati sono: dimensione

ridotta del campione, differenza dei tempi post-chirurgici e distribuzione di genere non bilanciata data l'assenza di stratificazione.

Effects of Innovative Land-based Proprioceptive Training on Knee Joint Position Sense and Function in Athletes with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Randomized Controlled Trial – Hajouj et al. 2021 ^[37]

Questo studio è un RCT che si pone l'obiettivo di indagare l'efficacia dell'aggiunta di un innovativo training propriocettivo basato sull'atterraggio alla riabilitazione accelerata standard nel migliorare il *joint position sense* (JPS) e la funzione del ginocchio dopo ACLR. I criteri di inclusione della popolazione erano: sesso maschile, età compresa fra 18 e 35 anni, ACLR unilaterale, meno di un mese tra infortunio e chirurgia e a 9 settimane dalla chirurgia con ROM completo in flessione-estensione. I criteri di esclusione erano: gonfiore che impediva di fare gli esercizi, segni di altri infortuni agli arti inferiori o di patologie associate di qualsiasi genere. I 30 soggetti inclusi, tutti atleti di livello amatoriale operati con autograft HT, sono stati randomizzati in due gruppi: il gruppo Conventional Therapy (CT) con 15 partecipanti di età media 24.33 ± 3.68 anni e il gruppo Proprioceptive Training (PT) con 15 partecipanti di età media 23.14 ± 3.03 anni. I due gruppi erano omogenei per caratteristiche di base. Entrambi i gruppi hanno eseguito lo stesso programma di fisioterapia convenzionale nelle prime 9 settimane dopo la chirurgia. Dalla nona settimana il gruppo CT ha proseguito il programma convenzionale composto da esercizi di rinforzo muscolare, training deambulatorio ed esercizi neuromuscolari di base, mentre il gruppo PT oltre al protocollo di base ha seguito una progressione di training propriocettivo composto da stanche monopodalico e squat monopodalici con inserimento graduale di superfici instabili, occhi chiusi, uso di palle o perturbazioni. Il gruppo CT svolgeva riabilitazione 3 volte a settimana, mentre il gruppo PT svolgeva, oltre alle 3 sedute di fisioterapia convenzionale, 2 sedute di training propriocettivo specifico, per un totale di 5 sedute. Entrambi i gruppi hanno protratto l'intervento per 6 settimane. Gli outcome valutati sono stati: la propriocezione, misurata attraverso il senso attivo della posizione articolare, il dolore, che è stato quantificato mediante la VAS e la funzionalità del ginocchio, valutata utilizzando il questionario IKDC. La propriocezione è stata valutata attraverso un test di

riproduzione della posizione articolare del ginocchio, utilizzando un dinamometro isocinetico sull'arto operato, misurando 5 volte l'errore tra l'angolo target e quello riprodotto e calcolando la media dei valori. Sono stati registrati l'errore assoluto (AE), l'errore variabile (VE) e l'errore costante (CE). Tutte le valutazioni cliniche sono state effettuate prima e dopo l'intervento riabilitativo. I limiti dichiarati dagli autori sono: campione ridotto e di esclusivo sesso maschile, assenza di follow-up a lungo termine e mancanza di test funzionali.

The Effects of Eccentric and Plyometric Training Programs and Their Combination on Stability and the Functional Performance in the Post-ACL-Surgical Rehabilitation Period of Elite Female Athletes – Kasmi et al. 2021 ^[38]

Questo RCT compara tre differenti tipologie di training (eccentrico, pliometrico e la combinazione di questi), ed il loro effetto sulla stabilità e sulla funzione in atlete donne di livello élite con ACLR. I criteri di inclusione nello studio prevedevano che le partecipanti fossero atlete di livello internazionale e che appartenessero alla nazionale tunisina del rispettivo sport, che prima dell'infortunio svolgessero attività in media 6-8 volte a settimana e che avessero subito la lesione di ACL con meccanismo *non-contact*. I criteri di esclusione erano: livello di attività ricreativa o assente, lesioni da contatto, graft differenti da QT o BTB o che fossero stati operati da chirurghi differenti e riabilitati da più fisioterapisti. Sono inoltre stati escluse le atlete con storia di lesioni muscolari o articolari, con scarsa frequenza al programma di riabilitazione ed atlete che avessero seguito un programma preoperatorio. Le 40 atlete incluse sono state randomizzate in 4 gruppi, stratificandoli per età e indice di massa corporea (BMI): gruppo Eccentric (ECC) composto da 10 soggetti con età media 20.3 ± 3.1 anni, il gruppo Plyometric (PLYO) composto da 10 atlete di età media 20.3 ± 3.4 anni, il gruppo combinato di Eccentric e Plyometric (COMB) con 10 soggetti con età media 20.2 ± 3.7 anni e il gruppo Control (CON) con altrettanti individui di età media 20.3 ± 3.3 anni. Per tutti i gruppi nelle prime 14 settimane è stato seguito un training standardizzato post-ACLR. Dalla quattordicesima settimana i gruppi sperimentali (ECC, PLYO e COMB) hanno aggiunto alla riabilitazione 2 sedute a settimana con programma specifico a seconda del gruppo di appartenenza dalla durata totale di 6 settimane. Il gruppo ECC prevedeva esercizi di

rinforzo con accento sulla componente eccentrica, in particolare di hamstring, quadricipite e glutei. Il programma PLYO si componeva di un training focalizzato sulla componente di salto, atterraggio e spinta in diverse formule: monopodalico, CMJ, frontale, laterale ed altre forme. Il gruppo COMB prevedeva una serie di esercizi comprendente entrambe le tipologie, mantenendo il medesimo volume degli altri gruppi. Il gruppo CON ha proseguito la riabilitazione standard. Gli outcome valutati sono stati: la stabilità dinamica valutata tramite *Y balance test* (Y-bal), la funzione tramite LKS, la prontezza per il RTS valutato con il questionario *Anterior Cruciate Ligament-Return to Sport after Injury Scale* (ACL-RSI) e LSI nel *Single Leg Hop Test*. Tutti i test sono stati condotti dopo 14 settimane dalla chirurgia (pre-randomizzazione) e dopo il training, a 20 settimane dall'intervento chirurgico. Lo studio non ha subito dropout. Gli autori dichiarano le seguenti limitazioni dello studio: scarsa dimensione del campione, omogeneità del campione che ha incluso solo atlete donne di alto livello, la ristrettezza del range di età che riduce la generalizzabilità dei risultati, assenza di controllo nutrizionale e delle attività esterne alla sperimentazione e la semplicità dei test funzionali utilizzati.

The effects of different rehabilitation training modalities on isokinetic muscle function and male athletes' psychological status after anterior cruciate ligament reconstructions – Kasmi et al. 2023 ^[39]

Si tratta di un secondo RCT degli stessi autori del precedente, che con gli stessi metodi analizzano la controparte maschile su outcome differenti. Lo studio ha lo scopo di confrontare gli effetti di tre differenti protocolli riabilitativi (allenamento eccentrico, pliometrico e la combinazione di questi) su variabili psicologiche (kinesiofobia, TSK-CF), funzionali (IKDC, KOOS, valutazione funzionale del ginocchio) e di performance muscolare misurate a diverse velocità angolari in atleti maschi d'élite sottoposti a ACLR. I criteri di eleggibilità sono gli stessi utilizzati nella selezione del campione femminile dello studio del 2021 dello stesso gruppo di ricerca.^[38] I 40 atleti inclusi sono stati randomizzati in 4 gruppi, stratificandoli per età e BMI: gruppo Eccentric (ECC) composto da 10 soggetti con età media 20.3 ± 2.83 anni, il gruppo Plyometric (PLYO) composto da 10 atlete di età media 20.3 ± 2.54 anni, il gruppo combinato di Eccentric e

Plyometric (COMB) con 10 soggetti con età media 20.6 ± 3.80 anni e il gruppo Control (CON) con altrettanti individui di età media 20.4 ± 3.34 anni. I protocolli previsti dai gruppi sono gli stessi dello studio precedentemente analizzato appartenente allo stesso gruppo di ricercatori.^[38] Gli outcome valutati sono stati aspetti psicologici (Tampa kinesiophobia score), questionari soggetti (KOOS e IKDC) e la forza muscolare di flessori ed estensori di ginocchio tramite test con dinamometro isocinetico. Sono stati estrapolati il *peak torque*, il lavoro totale, il rapporto *H/Q ratio* dei due valori precedenti e il LSI. Tutti i test sono stati condotti dopo 14 settimane dalla chirurgia (pre-randomizzazione) e dopo il training, a 20 settimane dall'intervento chirurgico. Lo studio non ha subito dropout. Gli autori dichiarano i seguenti limiti: scarsa dimensione del campione, omogeneità dello stesso, che ha incluso solo atleti uomini di alto livello, la ristrettezza del range di età che riduce la possibilità di generalizzare i risultati, l'assenza di controllo nutrizionale e delle attività esterne alla sperimentazione e la semplicità dei test funzionali utilizzati. Inoltre, evidenziano la mancanza di valutazioni funzionali e di RTS.

Effects of Supervised Plyometric Training on Neuromuscular and Knee Functions for Late Phase Rehabilitation Program in Patients with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Randomized Controlled Trial – Tepa et al. 2024 ^[40]

Questa pubblicazione è un RCT che si pone lo scopo di determinare gli effetti di un training pliometrico nelle fasi finali della riabilitazione sulla funzione neuromuscolare del ginocchio in pazienti con ACLR. I criteri di inclusione prevedevano che i pazienti fossero di età compresa tra 18 e 45 anni, e che avessero raggiunto estensione passiva entro 3° dall'arto non operato, flessione passiva entro 5° dall'arto non operato, dolore <2/10 nella *numerical rating scale* (NRS) e LSI di forza isocinetica almeno del 60% rispetto al controlaterale. Sono stati esclusi pazienti con infortuni pregressi agli arti inferiori, con patologie infiammatorie articolari, con deficit cognitivi o neuromuscolari e con aderenza al trattamento <80%. I pazienti reclutati sono stati 30, tutti atleti ricreativi (>85% del campione aveva *Tegner score* pre-infortunio di 7), tutti operati unilateralmente con autograft BTB o HT a 6-8 mesi dalla chirurgia dopo aver svolto un percorso di riabilitazione standard. Quelli inclusi nell'analisi finale sono stati 27,

randomizzati come segue: gruppo Resistance composto da 13 soggetti di cui 12 maschi e 1 femmina di età media 28.2 ± 6.8 anni di cui 4 operati con graft BTB e 9 operati con graft HT, e il gruppo Plyometric composto da 14 soggetti di cui 12 maschi e 2 femmine di età media 29.8 ± 7.7 di cui 4 operati con graft BTB e 10 con graft HT. Il regime di allenamento per entrambi i gruppi prevedeva 2 sedute a settimana per un periodo di 8 settimane. Il gruppo Resistance ha svolto un programma di esercizi di rinforzo con 3 serie da 10 ripetizioni con un carico pari al 75% del carico massimale, gli esercizi comprendevano squat, affondi, step up e heel raise. Il protocollo del gruppo Plyometric comprendeva esercizi a corpo libero con progressione nelle settimane del livello di difficoltà, includeva esercizi come squat jump, atterraggi laterali, pogo jump ed era in generale focalizzato su movimenti di salto e atterraggio. Gli outcome valutati sono stati: IKDC-SKF come questionario soggettivo, equilibrio sia statico che dinamico, analizzato rispettivamente tramite *unipedal stance test*, e SEBT, e la propriocezione misurata tramite riposizionamento dell'articolazione a determinati angoli su dinamometro isocinetico. Altri outcome presi in considerazione erano la forza muscolare di quadricipite e hamstring misurando il *peak torque* su dinamometro isocinetico e il tempo di salto tramite *6-meter timed hop test*. Le misurazioni sono state effettuate alla baseline pre-training e post-training. Le analisi sono state effettuate *per protocol*. Gli autori dichiarano i seguenti limiti: prevalenza del sesso maschile nel campione, baseline di forza di quadricipite già alta a causa del criterio di selezione che richiedeva una simmetria almeno del 60%, omogeneità nel livello sportivo del campione che ha incluso solo atleti ricreativi.

Late phase NMT

Effects of a neuromuscular training program using external focus attention cues in male athletes with anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized clinical trial – Ghaderi et al. 2021 ^[41]

Lo studio è un RCT, con cecità del valutatore rispetto all'assegnazione dei gruppi. Lo scopo dichiarato è valutare se un programma di NMT con focus esterno migliori la biomeccanica del salto, la propriocezione del ginocchio e la funzione riferita in atleti sottoposti a ACLR. I criteri di inclusione nello studio prevedevano sesso maschile, età compresa tra 23 e 31 anni, atleti di livello ricreativo o agonistico, sottoposti a ACLR con autograft HT. I soggetti dovevano già avere raggiunto la fase finale della riabilitazione ed essere pronti per il RTS (basato su criteri temporali), non avere dolore e gonfiore residui, ROM completo ed essere in grado di svolgere test funzionali e pliometrici. Sono stati esclusi coloro che presentavano lesioni concomitanti, che partecipavano ad altri programmi di riabilitazione durante lo studio e coloro che non hanno partecipato almeno all'80% delle sedute. I soggetti inclusi sono stati 24, e sono stati randomizzati in due gruppi: il gruppo sperimentale (NMT) composto da 12 individui di età media 26.9 ± 4.1 anni e il gruppo Control composto da 12 pazienti con età media 27.2 ± 3.3 anni. I programmi sono durati 8 settimane per entrambi i gruppi, durante le quali il gruppo di controllo ha proseguito il programma di esercizi sport-specifici non supervisionato, mentre il gruppo NMT ha seguito un protocollo di NMT supervisionato per 3 volte a settimana fino alla sesta settimana, per poi concludere con 2 sedute settimanali. Il programma del gruppo sperimentale prevedeva squat mono e bipodalici, drop jump, equilibrio su superfici instabili ed esercizi pliometrici, tutto svolto sotto stretta supervisione e con correzioni verbali tramite l'utilizzo di un focus esterno. Gli outcome valutati sono stati: aspetti biomeccanici, propriocezione e questionari soggettivi. In particolare, per l'analisi biomeccanica è stata svolta una valutazione cinematica e cinetica del *single leg drop* tramite sistema optoelettronico e pedane di forza. La propriocezione articolare è stata indagata mediante dinamometro isocinetico, calcolando l'AE tra l'angolo effettivamente raggiunto e l'angolo target, durante un compito di riposizionamento passivo del ginocchio ricostruito. Gli outcome soggettivi sono stati analizzati tramite IKDC e *Tegner score* per valutare la funzionalità percepita dagli atleti

dello studio. Tutte le variabili sono state testate prima della riabilitazione e al termine di questa, 8 settimane dopo. Durante la sperimentazione non ci sono stati dropout. Gli autori dichiarano le seguenti limitazioni dello studio: omogeneità del campione che ha incluso solo atleti uomini, riducendo la possibilità di generalizzare i risultati, utilizzo dell'arto controlaterale come riferimento, che può decondizionarsi e portare ad una sovrastima del recupero di quello operato, e l'assenza di un gruppo con focus cognitivo interno.

Late-stage rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction: A multicentre randomized controlled trial (PREP) – Niederer et al. 2023 ^[42]

Si tratta di un RCT multicentrico in doppio cieco che ha lo scopo di confrontare l'aderenza e l'efficacia di un programma di NMT nella *late phase* con la riabilitazione standard dopo ACLR. I criteri di inclusione prevedevano che i pazienti avessero meno di 36 anni, con lesione unilaterale di ACL e che avessero subito ACLR tramite autograft di semitendinoso o di HT. I soggetti dovevano essere stati coinvolti in qualche tipo di sport prima dell'infortunio e dovevano avere l'intenzione di tornare a praticarlo al termine della riabilitazione. Sono stati esclusi i pazienti che presentavano una lesione meniscale di dimensioni maggiori di 2cm, lesioni multi-legamentose, pregressa chirurgia all'arto non coinvolto o stati di infiammazione cronica. Lo studio ha incluso 112 soggetti, che sono stati randomizzati in due gruppi: il gruppo sperimentale (Stop-X) composto da 57 partecipanti, di cui 25 maschi e 32 femmine, di età media 25.1 ± 4.8 anni, e il gruppo Usual Care che, subendo 12 dropout prima della riabilitazione prevista, era composto da 43 partecipanti, di età media 26.1 ± 4.9 . In entrambi i gruppi circa il 90% erano atleti ricreativi e la restante parte di livello agonistico. L'avvio del programma riabilitativo era individualizzato e veniva stabilito in base a due criteri principali: la fine della fisioterapia standard prescritta e il raggiungimento di criteri di sicurezza per effettuare il RTS con opinione congiunta di ortopedico e fisioterapista. Entrambi i gruppi hanno seguito un programma domiciliare di esercizi, con una frequenza di 3 sedute settimanali della durata di circa 30 minuti ciascuna per un periodo di 5 mesi. Il gruppo di controllo seguiva un programma standard di prevenzione secondaria, non supervisionato, costituito da esercizi ad impatto e dinamici eseguiti sul

piano frontale, seguiti da manovre di *side-cutting* e da esercizi di stabilizzazione dinamica multidirezionale. I partecipanti ricevevano un programma di follow-up con punti chiave predefiniti, ma non erano previsti contatti regolari con istruttori né progressioni strutturate. Il gruppo Stop-X svolgeva invece un programma parzialmente supervisionato e strutturato e con progressione basata sul raggiungimento di obiettivi specifici predeterminati. Il protocollo comprendeva diverse componenti: educazione alle strategie preventive, esercizi di corsa e agilità, perturbazioni autoindotte, pliometria ed esercizi di rinforzo muscolare. Gli istruttori ricontattavano mensilmente i soggetti del gruppo Stop-X per monitorare l'aderenza e discutere la progressione ed entrambi i gruppi tenevano un diario riabilitativo. Gli outcome valutati hanno considerato sia aspetti funzionali che di autopercezione e i test sono stati condotti in autonomia dai pazienti filmandosi, per poi essere valutati da esperti in cieco. La misurazione funzionale primaria era la *Normalized Knee Separation Distance* (NKSD), definita come il rapporto percentuale tra la distanza interginocchia e la distanza interanca, misurata nelle tre fasi del ciclo di salto. Altri outcome funzionali erano l'equilibrio negli hop test nei vari piani e il *front hop for distance*. Gli outcome autoriportati comprendevano KOOS, ACL-RSI, *Tampa scale of kinesiophobia*, *Tegner score* e tasso di RTS. I follow-up sono stati mensili almeno fino al dodicesimo mese dalla chirurgia, assicurando almeno 6 valutazioni per ogni paziente. L'analisi è stata condotta secondo il principio *Intention To Treat*. Gli autori riportano le seguenti limitazioni: rischio di *reporting bias* poiché i diari dei pazienti indicavano nei primi due mesi un volume di lavoro maggiore nel gruppo Stop-X, punteggi già alti alla baseline in alcuni casi, campione inferiore al previsto e infine la scelta del NKSD come outcome primario, poiché ad oggi la sua rilevanza clinica è in discussione.

3.3: Rischio di bias degli studi

La seguente tabella riporta i punteggi della *PEDro scale* con i singoli item. La scala integrale è riportata nel paragrafo 2.5 del Capitolo 2.

Tabella I - *PEDro scale per il rischio di bias*

Articolo Item	<i>Hartigan et al. 2008</i>	<i>Zult et al. 2018</i>	<i>Minshull et al. 2021</i>	<i>Karimijashni et al. 2023</i>	<i>ACL-SPORTS trial (n=6)</i>	<i>Liu-Ambrose et al. 2002</i>	<i>Hajouj et al. 2021</i>
(1.)	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
2.	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
3.	No	Si	Si	No	No	No	Si
4.	No	Si	Si	Si	Si	No	Si
5.	No	No	No	No	No	No	No
6.	No	No	No	No	No	No	No
7.	No	Si	No	Si	Si	No	No
8.	No	No	Si	Si	Si	Si	Si
9.	No	No	No	Si	Si	No	No
10.	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
11.	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Totale	3/10	6/10	6/10	7/10	7/10	4/10	6/10

Articolo Item	<i>Kasmi et al. 2021</i>	<i>Kasmi et al. 2023</i>	<i>Tepa et al. 2024</i>	<i>Ghaderi et al. 2021</i>	<i>Niederer et al. 2023</i>
(1.)	Si	Si	Si	No	Si
2.	Si	Si	Si	Si	Si
3.	No	No	No	Si	Si
4.	Si	Si	Si	Si	No
5.	No	No	No	No	No
6.	No	No	No	No	No
7.	No	No	No	Si	Si
8.	No	No	Si	Si	No
9.	No	No	Si	Si	Si
10.	Si	Si	Si	Si	Si
11.	Si	Si	Si	Si	Si
Totale	4/10	4/10	6/10	8/10	6/10

3.4: Risultati degli studi

NMT Preoperatorio

Perturbation Training prior to ACL Reconstruction Improves Gait Asymmetries in Non-Copers - Hartigan et al. 2008 ^[24]

Lo studio valuta l'efficacia del trattamento tramite la misurazione della forza isometrica del quadricipite, derivandone poi il QI e l'escursione articolare del ginocchio nella *mid-stance* del cammino. Entrambi i gruppi hanno mostrato un miglioramento significativo della forza quadricipitale nel tempo ($p=0.002$). I valori medi del QI sono aumentati dal preoperatorio al follow-up di 6 mesi (Perturbation: da 87.2% a 97.1%; Strength: da 75.8% a 94.4%). Tuttavia, non sono emerse differenze significative tra i due gruppi. Il gruppo Perturbation ha mostrato un incremento dell'escursione del ginocchio in *mid-stance* rispetto all'arto non coinvolto, con conseguente assenza di differenze significative tra gli arti a 6 mesi dall'intervento (media = 3.58°; 95% CI [8.3, -1.4]; $p = 0.14$). Nel gruppo Strength, invece, le escursioni del ginocchio in *mid-stance* hanno continuato a risultare significativamente diverse tra gli arti a 6 mesi dalla chirurgia (media = 7.08°; 95% CI [11.6, -2.5]; $p = 0.007$).

Early phase NMT

Cross training

Cross-education does not accelerate the rehabilitation of neuromuscular functions after ACL reconstruction: a randomized controlled clinical trial – Zult et al. 2018 ^[25]

La variabile analizzata come outcome primario in questo studio è la MVC, calcolandone anche il LSI. Per quanto riguarda l'effetto del tempo, le MVCs dell'arto operato rispetto al periodo preoperatorio erano ridotte del 35% a 5 settimane dopo l'intervento (95% CI [-1.4, -0.9]) e del 12% a 12 settimane (95% CI [-0.7, -0.2]), mentre miglioravano dell'11% a 6 settimane dopo l'intervento (95% CI [0.0, 0.5]) (tutti $p \leq 0.015$). Nell'arto non operato le MVCs sono aumentate in tutti i follow-up (tutti $p < 0.001$). Per quanto riguarda la differenza tra i due gruppi la diminuzione della simmetria fra gli arti era del 10% maggiore nel gruppo sperimentale rispetto al gruppo di controllo a 5 settimane post-intervento (95% CI [2, 18]; $p = 0.017$) e del 9% maggiore a 12 settimane (95% CI

[1, 17]; $p = 0.030$), e tornava ai valori preoperatori a 26 settimane. Il gruppo sperimentale non ha quindi avuto miglioramenti significativi a lungo termine rispetto al controllo, e nelle prime fasi ha mostrato un peggioramento più marcato (seppur transitorio) della simmetria tra gli arti. Gli outcome secondari (contrazione volontaria, precisione di forza, propriocezione ed equilibrio) confermano i risultati principali: il protocollo sperimentale non ha determinato miglioramenti superiori rispetto al trattamento standard.

Contralateral strength training attenuates muscle performance loss following anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction: a randomised-controlled trial – Minshull et al. 2021 [26]

Questo studio come outcome primario ha considerato la QPF a 10 settimane dalla chirurgia, della quale è stata calcolata per ciascuno gruppo la diminuzione in percentuale rispetto al preoperatorio. La QPF è calata del 32% a 10 settimane dalla chirurgia nel gruppo CON, mentre è calata del 16.6% nel gruppo CE (95% CI [18, 85]; $p=0.004$). Anche l'arto non operato ha visto differenze significative con un incremento del 7% nel gruppo CE e una diminuzione del 7% nel gruppo CON (95% CI [28, 87]; $p < 0.001$). Gli outcome secondari (HPF, RFD, IKDC e hop tests) non hanno mostrato differenze significative nell'arto operato tra i due gruppi nei 2 follow-up.

The Effect of Contralateral Knee Neuromuscular Exercises on Static and Dynamic Balance, Knee Function, and Pain in Athletes Who Underwent Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Single-Blind Randomized Controlled Trial – Karimijashni et al. 2023 [27]

Questo studio utilizza per la valutazione i seguenti outcome primari: SEBT, *Stork Stance Balance Test*, BESS test, e l'LKS. Tra pre e post intervento, il gruppo di trattamento ha mostrato un miglioramento significativo intra-gruppo nelle prestazioni nel SEBT in quasi tutte le direzioni: anteriore (95% CI [-14.6, -6.69]), posteriore (95% CI [-16.89, -8.10]), mediale (95% CI [-9.22, -0.85]), antero-laterale (95% CI [-9.89, -0.75]), postero-mediale (95% CI [-12.53, -6.49]), postero-laterale (95% CI [-16.59, -7.15]) e nel punteggio composito (95% CI [-11.14, -4.39]). Sono stati osservati miglioramenti significativi anche nel BESS test, sia in posizione monopodolica su superficie rigida (95% CI [1.07, 3.45]) e su gommapiuma (95% CI [3.81, 6.85]), sia nella posizione

tandem su superficie rigida (95% CI [0.24, 1.88]) e su gommapiuma (95% CI [0.66, 3.86]), e infine i risultati dello *Stork stand test* hanno mostrato lo stesso andamento (95% CI [-12.52, -1.38]). Il gruppo di intervento ha mostrato un miglioramento significativo dell'equilibrio dinamico al SEBT nelle direzioni anteriore, posteriore, postero-mediale e postero-laterale, e nel punteggio composito (tutti $p \leq 0.01$). Anche il numero di errori al BESS test si è ridotto maggiormente rispetto al controllo in tutte le condizioni di appoggio (monopodolica e tandem, su superfici rigide e instabili; tutti $p \leq 0.03$). È emerso un miglioramento della stabilità monopodolica allo *Stork stand test* ($p = 0.044$). L'LKS, invece, non ha mostrato differenze significative tra i gruppi ($p = 0.71$). L'outcome secondario considerato era la VAS, e ha mostrato punteggi significativamente minori nel gruppo sperimentale ($p=0.014$).

Mid phase NMT

ACL-SPORTS trial

Nel protocollo di White e collaboratori^[28] vengono definiti gli outcome degli studi dell'ACL-SPORTS, definendo come primari la biomeccanica del cammino, il QI, gli *hop test*, i PROs e il *Knee joint loading*. Mentre sono secondari il tasso di RTS, il tasso di reinfortunio e i dati elettromiografici.

Report of the Clinical and Functional Primary Outcomes in Men of the ACL-SPORTS Trial: Similar Outcomes in Men Receiving Secondary Prevention With and Without Perturbation Training 1 and 2 Years After ACL Reconstruction – Arundale et al. 2017
[29]

Questo studio analizza il QI, gli *hop test*, i PROs e il tasso di RTS nella popolazione maschile dell'ACL-SPORTS trial. Non sono emerse differenze significative tra i gruppi per il QI ($p = 0.45$) né per le prestazioni in nessuno degli *hop test* a 1 o 2 anni dalla chirurgia (tutti $p > 0.30$). I questionari autoriportati (IKDC, KOOS–Sport e KOOS–QoL) non hanno mostrato differenze statisticamente significative tra SAP e SAP+PERT in nessuna delle fasi di valutazione (tutti $p > 0.13$). L'unica differenza statisticamente significativa è stata osservata nella variazione del punteggio IKDC tra 1 e 2 anni ($p = 0.03$), con un lieve aumento nel gruppo SAP e una riduzione nel gruppo SAP+PERT, ma tale variazione non ha raggiunto la soglia di rilevanza clinica, che richiede una *Minimal Clinically Important Difference* (MCID) dell'11.5%. A 1 anno non sono state rilevate differenze nella classificazione della funzione del ginocchio ($p = 0.18$), mentre a 2 anni tutti gli atleti del gruppo SAP presentavano una funzione del ginocchio classificata come normale secondo i valori normativi IKDC, a fronte di cinque atleti del gruppo SAP+PERT che non raggiungevano tali valori ($p = 0.03$). Il tempo medio per RTS non differiva significativamente tra gruppi ($p = 0.09$).

Report of the Primary Outcomes for Gait Mechanics in Men of the ACL-SPORTS Trial: Secondary Prevention With and Without Perturbation Training Does Not Restore Gait Symmetry in Men 1 or 2 Years After ACL Reconstruction – Capin et al. 2017 ^[30]

Questo studio, che considera solo la componente maschile dello studio, approfondisce le variabili biomeccaniche del cammino, in particolare gli angoli e i momenti articolari di anca e ginocchio sui piani sagittale e frontale, e le asimmetrie nel cammino. L'escursione del ginocchio dell'arto operato durante la fase di *mid-stance* è risultata simile tra i gruppi SAP e SAP+PERT ad entrambi i follow-up. Le differenze tra gruppi non erano significative né a 1 anno né a 2 anni, né per la flessione di ginocchio né per la flessione d'anca dell'arto operato (tutti $p > 0.37$). Non sono quindi emerse differenze tra i gruppi SAP e SAP+PERT per le variabili biomeccaniche del cammino. Entrambi i gruppi hanno mostrato asimmetrie del cammino tra i due arti (tutti $p < 0.031$), senza differenze significative tra i gruppi SAP e SAP + PERT.

Two year ACL reinjury rate of 2.5%: outcomes report of the men in a secondary ACL injury prevention program (ACL-SPORTS) – Arundale et al. 2018 ^[31]

Questo studio prende in considerazione la tempistica e percentuale di RTS, il livello di RTS e il tasso di reinfortunio ad 1 e 2 anni dalla chirurgia nella popolazione maschile dell'ACL-SPORTS trial. Il tempo medio per il superamento dei criteri di RTS è stato di 232 ± 99 giorni. A 1 anno dall'intervento, il 95% degli atleti era tornato a praticare sport a qualche livello, mentre il 78% era tornato al livello pre-infortunio. A 2 anni, tutti gli atleti avevano ripreso l'attività sportiva, e solo due non avevano ancora raggiunto il livello pre-infortunio. È stata riportata una sola recidiva ipsilaterale, corrispondente ad un'incidenza del 2.5%.

Functional and Patient-Reported Outcomes Improve Over the Course of Rehabilitation: A Secondary Analysis of the ACL-SPORTS Trial – Arundale et al. 2018 ^[32]

Questa analisi secondaria dell'ACL-SPORTS trial analizza l'intera popolazione dello studio, in particolare prende in considerazione il QI, gli hop test e alcuni PROs. Non sono emerse differenze significative tra i gruppi SAP e SAP + PERT né alla baseline né post-training per nessuna delle variabili analizzate. Entrambi i gruppi hanno mostrato miglioramenti significativi in tutti gli outcome funzionali e nei PROs, ad eccezione del QI, che non è aumentato in modo significativo né nel gruppo SAP ($p = 0.58$) né nel gruppo SAP + PERT ($p = 0.11$). I gruppi sono poi stati sciolti ed è stato svolto un confronto per sesso. Entrambi i sessi hanno mostrato miglioramenti significativi in tutti

i PROs e negli *hop test*. Tuttavia, il QI è aumentato in modo significativo solo negli uomini ($p = 0.02$), mentre nelle donne non si sono osservati cambiamenti significativi ($p = 0.86$). In entrambi i gruppi si sono registrati incrementi clinicamente rilevanti nel KOOS-Sport/Recreation, superiori alla MCID dell'8%. Per il KOOS-Quality of Life (KOOS-QoL), l'aumento è stato significativo soltanto negli uomini, superando la MCID, mentre nelle donne l'incremento non ha raggiunto la soglia di rilevanza clinica.

Superior 2-Year Functional Outcomes Among Young Female Athletes After ACL Reconstruction in 10 Return-to-Sport Training Sessions – Capin et al. 2019 ^[33]

Questo articolo analizza la popolazione femminile dell'ACL-SPORT trial valutandone il QI, gli *hop test*, alcuni PROs e il tasso di RTS e di recidiva. Durante i follow-up, non sono emerse differenze statisticamente né clinicamente significative tra i gruppi per nessuno degli outcome considerati. A 2 anni post-intervento, il 100% le atlete erano tornate allo sport, e l'87% aveva raggiunto il livello pre-infortunio. Non vi erano differenze significative tra gruppi nel tasso di ritorno allo sport ($p = 0.182$).

A Secondary Injury Prevention Program May Decrease Contralateral Anterior Cruciate Ligament Injuries in Female Athletes: 2-Year Injury Rates in the ACLSPORTS Randomized Controlled Trial – Johnson et al. 2020 ^[34]

Questo articolo approfondisce l'incidenza delle recidive nella popolazione femminile dell'ACL-SPORTS trial, fino a 2 anni dalla chirurgia. Nel corso di questo periodo si sono verificate 9 seconde lesioni, pari a un tasso complessivo del 23%. Le lesioni comprendevano 4 rotture del graft e 5 infortuni controlaterali; tutti i casi si sono verificati in atlete con autograft HT. Non sono state riscontrate differenze significative tra i gruppi SAP e SAP + PERT né per la frequenza ($p = 0.77$) né per il lato ($p = 0.25$), pertanto i gruppi sono stati accorpati per svolgere un'analisi per età. Quest'ultima ha mostrato che 8/9 recidive si sono verificate in atlete con età <18 anni al momento della chirurgia primaria, e tutte 9 in atlete sotto i 20 anni; tuttavia, non è emersa alcuna differenza statisticamente significativa per categoria di età.

Altri articoli Mid phase

The effects of proprioceptive or strength training on the neuromuscular function of the ACL reconstructed knee: a randomized clinical trial – Liu-Ambrose et al. 2002 ^[36]

Questo articolo utilizza per la valutazione dell'efficacia del training propriocettivo la forza di quadricipite ed hamstring (*average peak torque* e *PeakTT*), la funzione tramite hop test e diversi PROs. Il gruppo sperimentale PT ha mostrato un aumento significativo rispetto al gruppo controllo ST nell'*average concentric quadriceps torque* (95% CI [-14.3, -10.7]; $p = 0.005$) e nell'*eccentric hamstring torque* (95% CI [-10.7, -14.5]; $p = 0.04$), nessuna differenza significativa nel *concentric hamstring torque* e nell'*eccentric quadriceps torque*. Nel *PeakTT* non sono emerse differenze significative all'interno dei gruppi ($p = 0.798$) né fra i due gruppi ($p = 0.082$). Negli *hop test* entrambi i gruppi hanno mostrato netti miglioramenti con entrambi gli arti, senza differenze significative tra i due gruppi ($p > 0.150$). I risultati dei PROs hanno evidenziato miglioramenti significativi in entrambi i gruppi fra prima e dopo il trattamento ($p = 0.003$), senza nessuna differenza significativa tra i due gruppi ($p = 0.297$).

Effects of Innovative Land-based Proprioceptive Training on Knee Joint Position Sense and Function in Athletes with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Randomized Controlled Trial – Hajouj et al. 2021 ^[37]

Questo studio nella la valutazione considera la propriocezione, il dolore (tramite VAS) e il questionario soggettivo IKDC. Entrambi i gruppi hanno mostrato miglioramenti significativi nell'AE e nel VE nei test propriocettivi e nell'IKDC (tutti $p < 0.05$), al contrario il CE non ha mostrato cambiamenti significativi in nessuno dei due gruppi ($p > 0.05$). Nel confronto tra i due gruppi sono emerse differenze significative a favore del gruppo PT nell'AE e nel VE (entrambi $p < 0.001$), mentre non è stata rilevata nessuna differenza significativa per quanto riguarda il CE, la VAS e l'IKDC (tutti $p > 0.05$).

The Effects of Eccentric and Plyometric Training Programs and Their Combination on Stability and the Functional Performance in the Post-ACL-Surgical Rehabilitation Period of Elite Female Athletes – Kasmi et al. 2021 ^[38]

Gli outcome valutati in questa pubblicazione sono stati: Y-bal, LKS, la prontezza per il RTS valutato con il questionario ACL-RSI e LSI nel *Single Leg Hop Test*. L'effetto principale del tempo è stato osservato per tutte le variabili considerate fra pre e post-intervento ($p < 0.001$), e sono emerse differenze significative nell'effetto di interazione gruppo x tempo per Y-bal ($p < 0.001$), per l'LKS ($p < 0.001$) e per l'ACL-RSI ($p < 0.001$). Le analisi post-hoc sottolineano che i gruppi COMB e PLYO hanno avuto miglioramenti simili per Y-bal, significativamente superiori rispetto a ECC e CON ($p < 0.001$). Il gruppo COMB ha avuto incrementi superiori rispetto a PLYO, ECC e CON nei punteggi dell'LKS ($p < 0.001$). Negli *hop test* il gruppo COMB ha avuto LSI migliori di tutti gli altri gruppi ($p < 0.001$), e il gruppo PLYO ha superato in modo significativo ECC e CON ($p < 0.001$). Allo stesso modo il gruppo ECC è risultato superiore al gruppo CON ($p < 0.001$).

The effects of different rehabilitation training modalities on isokinetic muscle function and male athletes' psychological status after anterior cruciate ligament reconstructions – Kasmi et al. 2023 ^[39]

Gli outcome valutati in questo studio sono stati: aspetti psicologici (*Tampa kinesiphobia score*), questionari soggetti (KOOS e IKDC) e la forza muscolare di flessori ed estensori di ginocchio tramite test con dinamometro isocinetico. Per quanto riguarda le analisi psicologiche, l'analisi ha evidenziato un effetto principale del tempo su *Tampa kinesiphobia score*, KOOS e IKCD (tutti $p < 0.001$), per gli stessi è emerso un significativo effetto di interazione gruppo x tempo (tutti $p < 0.001$). Il gruppo COMB ha avuto un miglioramento significativo rispetto agli altri gruppi su tutte le variabili considerate ($p < 0.001$). Il gruppo PLYO ha mostrato miglioramenti significativi rispetto a ECC e CON per IKCD e *Tampa kinesiphobia score* ($p < 0.05$). Le analisi post-hoc hanno mostrato differenze significative tra i gruppi nel rapporto H/Q del *peak torque* e il *total work* alle velocità di 90°, 180° e 240°/s. Le differenze medie dei rapporti H/Q tra arto operato e non operato risultavano più contenute nel gruppo COMB rispetto ai gruppi ECC e PLYO ($p < 0.001$). Inoltre, il gruppo ECC ha presentato differenze significativamente minori rispetto ai gruppi CON e PLYO ($p < 0.001$), mentre il gruppo CON ha mostrato valori migliori del PLYO ($p < 0.005$). È stato poi valutato l'ILSI

(definito come $ILSI = LSI - 100$) del *peak torque* e del *total work* dei muscoli estensori a 90°, 180° e 240°/s e l'indice risultava più basso nel gruppo COMB rispetto ai gruppi ECC, PLYO e CON ($p < 0.001$). Anche il gruppo ECC mostrava valori di ILSI inferiori rispetto ai gruppi PLYO e CON ($p < 0.001$). Per l'ILSI del *peak torque* dei muscoli flessori, a tutte le velocità l'indice era più basso nei gruppi COMB e PLYO rispetto ai gruppi ECC e CON ($p < 0.001$). Infine, per l'ILSI del *total work*, alle velocità di 180° e 240°/s il gruppo COMB ha mostrato valori inferiori rispetto ai gruppi ECC, PLYO e CON ($p < 0.001$), mentre a 90°/s sia il gruppo COMB che il PLYO presentavano un ILSI più basso rispetto ai gruppi eccentric e control ($p < 0.001$).

Effects of Supervised Plyometric Training on Neuromuscular and Knee Functions for Late Phase Rehabilitation Program in Patients with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Randomized Controlled Trial – Tepa et al. 2024 ^[40]

Gli outcome valutati sono stati: IKDC, equilibrio valutato con *unipedal stance test*, SEBT, propriocezione, *peak torque* di quadricipite e hamstring e infine *single leg 6-meter timed hop test*. I risultati del *single leg 6-meter timed hop test* sono cambiati in modo più significativo nel gruppo plyometric (95% CI [-1.6, -0.7]) rispetto al gruppo resistance (95% CI [-1.0, -0.1]) ($p = 0.041$). Lo stesso si può dire per l'LSI ($p = 0.041$). Nella propriocezione il gruppo plyometric ha avuto miglioramenti significativi (95% CI [-4.3, -1.9]), maggiori rispetto al gruppo resistance (95% CI [-2.0, 0.4]) ($p = 0.009$). Nell'*unipedal stance test* il gruppo plyometric ha mostrato miglioramenti significativi (95% CI [2.7, 25.2]), maggiori rispetto al gruppo resistance (95% CI [-14.3, 9.1]) ($p = 0.045$). Nell'equilibrio dinamico valutato tramite SEBT il gruppo plyometric ha evidenziato miglioramenti significativamente superiori rispetto al gruppo resistance nella direzione anteriore ($p = 0.005$), nella direzione posterolaterale ($p = 0.044$) e nel punteggio complessivo ($p = 0.028$). Non sono emerse differenze significative tra i due gruppi nelle diverse variabili di forza valutate (*peak torque*, *average torque* e *peak power*) degli estensori e dei flessori dell'arto affetto (tutti $p > 0.1$), e l'IKDC non si è modificato in modo significativo in nessuno dei due gruppi.

Late phase NMT

Effects of a neuromuscular training program using external focus attention cues in male athletes with anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized clinical trial – Ghaderi et al. 2021 ^[41]

In questo studio è stata svolta un'analisi biomeccanica del *single leg drop*, e la propriocezione è stata indagata mediante riposizionamento articolare. Sono stati proposti i questionari IKDC e *Tegner score*. Le analisi post hoc hanno mostrato differenze significative tra i gruppi a favore del gruppo sperimentale dopo l'intervento. In particolare, quest'ultimo ha mostrato miglioramenti nella flessione di tronco ($p = 0.003$), anca ($p = 0.008$) e ginocchio ($p = 0.012$) durante il *single leg drop*, rispetto al gruppo di controllo. Inoltre, il gruppo sperimentale ha mostrato valori inferiori di abduzione del ginocchio ($p = 0.018$), rotazione interna del ginocchio ($p = 0.022$), *loading rate* ($p = 0.016$), forza di taglio tibiale anteriore ($p = 0.018$), momento estensorio del ginocchio ($p = 0.022$) e momento in abduzione del ginocchio ($p = 0.014$). Il gruppo sperimentale ha mostrato anche minori errori di JPS ($p = 0.001$) e picco della forza di reazione verticale del suolo (*vGRF*, $p = 0.008$). Nel gruppo di controllo non sono state riscontrate variazioni significative rispetto alla baseline. Il gruppo sperimentale ha ottenuto punteggi IKDC significativamente più elevati rispetto al gruppo di controllo (sperimentale: $p = 0.003$; controllo: $p = 0.550$) con un incremento medio del 19.1%, superando la MCID del questionario, pari all'11.5%.

Late-stage rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction: A multicentre randomized controlled trial (PReP) – Niederer et al. 2023 ^[42]

In questo studio è stata valutata primariamente la NKSD misurata in 3 fasi del ciclo del salto. Altri outcome funzionali valutati sono l'equilibrio negli hop test nei vari piani e il *front hop for distance*. Gli outcome autoriporati comprendevano KOOS, ACL-RSI, *Tampa scale of kinesiophobia*, *Tegner score* e tasso di RTS. il gruppo sperimentale ha riportato migliori risultati nel questionario KOOS-Sport (95% CI [24.4, 104.3]), nel ACL-RSI (95% CI [10.7, 114.2]), nel KOOS-Pain (95% CI [36.0, 129.6]), nel KOOS-ADL (95% CI [6.4, 135.7]) e maggiore simmetria dell'arto nel *front hop for distance* a 3 e 4 mesi (95% CI [0.10, 0.57]; 95% CI [0.08, 0.54]). Non sono invece emerse

differenze significative *between-groups* per l'NKSD (outcome primario), per il punteggio KOOS-Symptoms, la *Tampa scale of kinesiophobia* o altri outcome soggettivi. In generale, ma non per l'outcome primario, i risultati del gruppo sperimentale erano lievemente superiori rispetto al controllo nei primi tre mesi, ma non si sono mantenuti al follow-up di cinque mesi, in cui non sono state riscontrate differenze tra i gruppi. Al termine del periodo di intervento, il 79% dei partecipanti del gruppo Stop-X e il 70% del gruppo Usual Care erano tornati al proprio sport e livello pre-infortunio ($p < 0.05$)

3.5: Sintesi dei risultati

Tabella II - Tabella sinottica

Articolo	Campione	NMT	Obiettivi e Outcome	Risultati	PEDro Score
Preoperatorio					
Hartigan et al. 2008 ^[24]	19 soggetti, atleti di livello I o II (M=13 e F=6) di età compresa tra i 17 e i 50 anni. Randomizzati in gruppo Strength e gruppo Perturbation.	<i>Perturbation training</i>	Indagare l'effetto del <i>perturbation training</i> preoperatorio sulla simmetria del cammino post-operatoria e sulla forza di quadricipite.	Entrambi i gruppi hanno recuperato la forza del quadricipite, solo il gruppo con <i>perturbation training</i> preoperatorio ha raggiunto la simmetria del cammino.	3/10
Early phase					
Zult et al. 2018 ^[25]	44 soggetti (M=24 e F=20) di età compresa fra 18 e 38 anni, atleti ricreativi. Randomizzati in Experimental group e Control Group.	<i>Cross training</i>	Indagare se il <i>cross training</i> accelera il recupero della forza del quadricipite post-chirurgia.	Nessun effetto vantaggioso del <i>cross training</i> rispetto al gruppo di controllo negli outcome primari e secondari.	6/10
Minshull et al. 2021 ^[26]	44 pazienti (M=25 F=19), di età compresa fra 16 e 60 anni, atleti ricreativi. Randomizzati in due gruppi: Cross education e Control.	<i>Cross training</i>	Indagare gli effetti dell'esercizio di <i>cross education</i> sulla forza (QPF e HPF) e sulla funzione (hop test, IKDC e RFD).	QPF ha mostrato una significativa differenza tra i due gruppi a 10 settimane, con riduzione della perdita di forza nel gruppo CE. Nessuna differenza significativa sugli outcome secondari.	6/10

Karimijashni et al. 2023 ^[27]	30 uomini di età compresa tra 18 e 40 anni, atleti ricreativi. Randomizzati in gruppo Intervention e gruppo Control.	<i>Balance Cross training</i>	Studiare gli effetti del <i>cross training</i> basato sull'equilibrio su balance, funzionalità il dolore.	Il gruppo con <i>cross training</i> ha mostrato miglioramenti nell'equilibrio e nel dolore rispetto al controllo. Nessuna differenza significativa nell'LKS.	7/10
<i>Mid Phase</i>					
Arundale et al. 2017 (ACL-SPORTS trial) ^[29]	40 uomini, atleti di livello I e II, di età compresa fra 15 e 54 anni. Randomizzati in SAP e SAP+PERT.	<i>Perturbation training</i>	Determinare l'effetto dell'aggiunta del <i>perturbation training</i> su QI, hop test, RTS e PROs.	Non sono emerse differenze significative negli outcome funzionali e nei PROs fra il gruppo SAP e SAP+PERT ad 1 e 2 anni dalla chirurgia.	7/10
Capin et al. 2017 (ACL-SPORTS trial) ^[30]	40 uomini, atleti di livello I e II, di età compresa fra 15 e 54 anni. Randomizzati in SAP e SAP+PERT.	<i>Perturbation training</i>	Determinare l'effetto di SAP e SAP+PERT su biomeccanica e asimmetrie del cammino.	Nessuno dei due gruppi ha ristabilito la simmetria del cammino a 1 e 2 anni dall'ACLR, nonostante entrambi l'abbiano migliorata.	6/10
Arundale et al. 2018 - <i>Reinjury rate</i> (ACL-SPORTS trial) ^[31]	40 uomini, atleti di livello I e II, di età compresa fra 15 e 54 anni. Randomizzati in SAP e SAP+PERT.	<i>Perturbation training</i>	Riportare il tasso di RTS e di reinfortunio di ACL negli uomini arruolati nel trial ACL-SPORTS.	Il 95% tornato allo sport dopo un anno, il 78% al livello pre-infortunio. Dopo due anni, tutti sono tornati a praticare sport. È stata registrata una recidiva ipsilaterale (2.5% di recidive).	6/10

Arundale et al. 2018 - <i>Functional outcome</i> (ACL-SPORTS trial) ^[32]	80 soggetti (M=40 F=40), atleti di livello I e II, di età compresa fra 15 e 54 anni. Randomizzati in SAP e SAP+PERT.	<i>Perturbation training</i>	Valutare l'effetto nel breve termine del trattamento su outcome funzionali (QI e hop test) e PROs. Confrontare gli effetti sui due sessi.	Miglioramento sostanziale di tutti gli outcome per entrambi i gruppi, fatta eccezione per il QI, che non è migliorato in nessuno dei due gruppi. L'analisi dei due sessi ha evidenziato miglioramento netto del QI negli uomini e non nelle donne.	6/10
Capin et al. 2019 (ACL-SPORTS trial) ^[33]	40 donne, atlete di livello I e II, di età compresa fra 13 e 24 anni. Randomizzate in SAP e SAP+PERT.	<i>Perturbation training</i>	Confrontare gli effetti di SAP vs SAP+PERT su giovani atlete in termini di forza, hop test, PROs e RTS a 1 e 2 anni.	Nessuna differenza significativa tra i due gruppi, con i gruppi uniti si osservano 100% di RTS, 87% ai livelli pre-infortunio. Punteggi alti ai PROs.	6/10
Johnson et al. 2020 (ACL-SPORTS trial) ^[34]	39 donne, atlete di livello I e II, di età compresa fra 13 e 55 anni. Randomizzate in SAP e SAP+PERT.	<i>Perturbation training</i>	Valutare se l'aggiunta del PERT al protocollo SAP aiuta a ridurre il rischio di reinfortunio nelle giovani atlete.	Nessuna differenza significativa tra i due gruppi, tasso di recidiva del 23%, con 9 reinfortuni di ACL (ipsi o controlaterale), la maggior parte in atlete operate a meno di 18 anni. Minore efficacia dei protocolli rispetto agli uomini.	6/10

Liu-Ambrose et al. 2002 ^[36]	10 pazienti (M=4 F=6) di età compresa tra i 20 e i 30 anni. Randomizzati in Strength group (ST) e Proprioceptive group (PT).	Training propriocettivo	Determinare gli effetti di un training propriocettivo paragonato ad un training di rinforzo sulla forza muscolare (<i>average Peak torque</i>) e sulla funzione di ginocchio (hop test e PROs).	Entrambi i gruppi hanno portato miglioramenti, senza però differenze tra i due gruppi. Unico outcome con PT>ST è stata la forza isotonica dell'arto operato.	4/10
Hajouj et al. 2021 ^[37]	30 uomini atleti amatoriali di età compresa fra i 18 e i 35 anni. Randomizzati in Proprioceptive (PT) e Conventional (CT).	Training propriocettivo con <i>foam roll</i>	Indagare gli effetti dell'integrazione di un training propriocettivo innovativo sulla funzionalità del ginocchio (IKDC), sul dolore (VAS) e sul JPS in atleti di sesso maschile.	Il gruppo PT si è mostrato superiore al CT dopo 6 settimane di trattamento nella riduzione dell'errore nel JPS, per gli altri outcome nessuna differenza significativa, con miglioramento di entrambi i gruppi.	6/10
Kasmi et al. 2021 ^[38]	40 donne, atlete di calibro nazionale. Randomizzate in Eccentric (ECC), Plyometric (PLYO), Eccentric+Plyometric (COMB) e Control (CON).	Training eccentrico e/o pliometrico	Confrontare gli effetti dei tre diversi protocolli sull'equilibrio dinamico (Y-bal), sull'LKS, sull'ACL-RSI e sull'LSI del <i>single leg hop test for distance</i> in atlete élite.	Gruppo COMB ha riportato miglioramenti maggiori in Y-bal, LKS, ACL-RSI e LSI per gli hop test rispetto a tutti gli altri gruppi. PLYO in alcuni casi migliore di ECC.	4/10

Kasmi et al. 2023 ^[39]	40 uomini (intervallo di età non specificato), atleti di calibro nazionale. Randomizzati in Eccentric (ECC), Plyometric (PLYO), Eccentric+Plyometric (COMB) e Control (CON).	Training eccentrico e/o pliometrico	Confrontare gli effetti dei tre programmi riabilitativi su aspetti psicologici (<i>Tampa Kinesiophobia scale</i>), sulla funzione di ginocchio (PROs) e sulla forza (<i>Peak torque</i> , lavoro totale, H/Q ed LSI).	Tutti i gruppi hanno mostrato miglioramenti, ma il gruppo COMB ha riportato guadagni maggiori in termini di aspetti psicologici, PROs e molti outcome di forza muscolare. PLYO migliore di ECC e CON in molti indici.	4/10
Tepa et al. 2024 ^[40]	30 pazienti (M=27 F=3) di età compresa tra 18 e 45 anni, atleti ricreativi. Randomizzati in Resistance group e Plyometric group.	Training pliometrico	Determinare l'effetto di un training pliometrico nelle fasi tardive della riabilitazione sulla funzione di ginocchio (IKDC), sull'equilibrio statico e dinamico e sulla proprioccezione. Inoltre, sono stati valutati forza (<i>Peak torque</i>) e capacità di salto (<i>6-meter timed hop test</i>).	Il gruppo Plyometric ha avuto risultati nettamente migliori nel tempo di salto, nell'LSI e nella proprioccezione. Risultati migliori anche nell'equilibrio statico. Forza e IKDC invariati in entrambi i gruppi.	6/10

<i>Late phase</i>					
Ghaderi et al. 2021 ^[41]	24 uomini di età compresa tra 23 e 31 anni, atleti ricreativi ed agonisti. Randomizzati in gruppo sperimentale NMT e Control group.	Training pliometrico e propriocettivo	Valutare se un programma di NMT con focus esterno migliori la biomeccanica dell'atterraggio (<i>single leg drop</i>), la propriocezione e la funzione riferita (IKDC e <i>Tegner score</i>).	Il gruppo sperimentale ha mostrato miglioramenti significativi in tutte le variabili biomeccaniche considerate rispetto al controllo, riduzione del valgo-dinamico e miglioramento della propriocezione. Migliorati anche i punteggi dei PROs.	8/10
Niederer et al. 2023 ^[42]	100 partecipanti (M=53 F=47), di età media 25 anni, atleti principalmente ricreativi. Randomizzati in gruppo sperimentale (Stop-X) e gruppo Usual care.	<i>Stop-X protocol</i> : controllo motorio, <i>perturbation training</i> e pliometria	Valutare l'efficacia di un programma di NMT nella <i>late phase</i> su aspetti funzionali (NKSD e hop test) e di autovalutazione (PROs).	L'intervento Stop-X non ha mostrato differenze significative nell'outcome primario, ovvero NKSD. Ha mostrato effetti leggermente superiori per molti degli outcome secondari (PROs e hop tests). Tuttavia, la superiorità è limitata ai primi 3 mesi, per poi pareggiarsi nei follow-up successivi.	6/10
Note					
La presente tabella riassume le caratteristiche principali e i risultati di ciascuno studio. Tutti gli studi inclusi sono RCT o analisi secondarie degli stessi e la popolazione è composta da atleti adulti con lesione isolata di ACL trattata chirurgicamente con diverse tipologie di graft.					

CAPITOLO 4: DISCUSSIONE

4.1: Interpretazione dei risultati

I risultati variano a seconda della fase della riabilitazione considerata, pertanto anche nella loro interpretazione gli articoli verranno messi a confronto ed analizzati secondo questo criterio.

NMT preoperatorio

Solamente uno studio analizza l'effetto del NMT preoperatorio, e si tratta di Hartigan et al. 2008.^[24] Lo studio conclude che il *perturbation training* sia più efficace del training di forza nel ristabilire la simmetria del cammino a 6 mesi dall'intervento chirurgico, e che entrambi i gruppi recuperino la forza di quadricipite nello stesso periodo (LSI > 90%). Questo non è in linea con il resto della letteratura, che riscontra asimmetrie biomeccaniche e di forza anche a lungo termine dopo ACLR,^[12,43,23,44] suggerendo che l'inserimento del NMT preoperatorio possa avere influenza positiva sugli outcome a lungo termine. Uno dei possibili meccanismi per spiegare questi risultati potrebbe essere che il *perturbation training* riduce la co-contrazione muscolare di quadricipite ed hamstring,^[45] con possibile effetto positivo sull'escursione articolare. Tuttavia, risulta doveroso analizzare la struttura dei due protocolli: il protocollo del gruppo sperimentale prevedeva il *perturbation training* in addizione al protocollo standard previsto dal gruppo di controllo, non è perciò da escludere un possibile effetto del volume maggiore di esercizio svolto dal gruppo sperimentale. Inoltre, la sola variabile biomeccanica presa in considerazione è l'escursione articolare nella fase di *mid stance*, senza considerare le variabili biomeccaniche considerate fattori di rischio di reinfortunio^[46] o correlate una migliore funzione percepita,^[17] con il rischio di ridurre la rilevanza clinica dei risultati dello studio. Inoltre, la dimensione del campione rappresenta un importante limite dello studio, con soli 19 soggetti analizzati.

Early phase NMT

Gli articoli che riguardano le prime fasi post-ACLR si concentrano in particolare sul *cross training*, un approccio che prevede che l'allenamento unilaterale determini miglioramenti nell'arto controlaterale non allenato. L'esistenza dell'effetto di *cross*

education è appurato in letteratura, tuttavia non è ancora del tutto chiaro il meccanismo alla base.^[47] Gli studi più recenti suggeriscono che l'effetto sia spiegato principalmente da un aumento della trasmissione neurale originata dalla corteccia motoria controlaterale non allenata, ma che per comprendere appieno l'effetto positivo della *cross education* sull'adattamento del muscolo scheletrico sia necessario considerare anche fattori periferici, oltre a quelli centrali.^[47] La letteratura su questo argomento è vasta, tuttavia sono limitate le evidenze che ne testano l'efficacia nella riabilitazione post-ACLR negli atleti. I risultati evidenziati dagli articoli inclusi in questa revisione^[25-27] sono discordanti tra loro, lo studio di Zult e collaboratori conclude che il *cross training* concentrico ad alte ripetizioni (8-10 RM) non apporti alcun beneficio aggiuntivo rispetto al gruppo di controllo nel recupero della forza di quadricipite,^[25] mentre lo studio di Minshull e collaboratori ha riscontrato una perdita di forza significativamente minore nel gruppo con *cross education* con focus eccentrico a basso numero di ripetizioni (3-5 RM).^[26] Gli stessi risultati sono stati osservati su popolazioni più omogenee e non atletiche.^[48,49] I differenti protocolli di *cross training* possono giocare un ruolo fondamentale in questa discrepanza, in quanto le evidenze suggeriscono che la modalità eccentrica di *cross training* sia più efficace nel trasferire la forza all'arto controlaterale^[50] e nel determinare maggiori modificazioni dell'eccitabilità e dell'inibizione corticale.^[51] Emerge quindi la solida possibilità che il *cross training*, in particolare con focus eccentrico a basse ripetizioni e alto carico, possa avere rilevanza clinica nel ridurre la perdita di forza quadricipitale nelle prime fasi post-ACLR sfruttando meccanismi principalmente neurali e corticali. Questa applicazione risulta particolarmente rilevante in caso di immobilizzazione dell'arto operato, con impossibilità di allenarlo direttamente. Può risultare quindi uno strumento efficace nel reinstaurare l'attività muscolare in caso di inibizione muscolare artrogenica (AMI), condizione frequente post-ACLR che comporta la perdita, più o meno massiva, dell'attivazione volontaria del quadricipite. Questo aspetto ha forti implicazioni cliniche, data l'alta incidenza di AMI nei soggetti che sostengono una lesione di ACL e dato che risulta frequentemente refrattaria ai protocolli riabilitativi convenzionali, determinando la persistenza di deficit neuromuscolari dopo la chirurgia.^[52] In letteratura è stata analizzata un'altra tipologia di *cross training*, basata su esercizi di balance.

Karimijashni e collaboratori hanno evidenziato l'efficacia nel breve termine del *cross training* su superfici instabili nel miglioramento del dolore e dell'equilibrio nella popolazione atletica,^[27] risultati confermati successivamente dallo studio di Liu e collaboratori su popolazione non atletica.^[53] Queste evidenze suggeriscono nuove potenzialità per l'applicazione del *cross training*, tuttavia, la scarsa comprensione dei meccanismi neurofisiologici sottostanti ne limita la trasferibilità clinica e sottolinea la necessità di ulteriori studi volti a chiarirne il funzionamento.

Mid phase NMT

Gli articoli della *mid phase* analizzati si concentrano su approcci differenti. Per quanto riguarda l'insieme di pubblicazioni che compongono l'ACL-SPORT trial,^[28-34] queste sono concordi nel concludere che l'aggiunta del *perturbation training* al protocollo SAP non modifichi gli outcome in modo significativo. Tuttavia, dai singoli studi sono emersi dati interessanti. I tassi di RTS e di recidiva riscontrati nella popolazione maschile risultano nettamente migliori di quelli documentati in letteratura, poiché a dodici mesi dalla ACLR, il 95% dei partecipanti aveva ripreso l'attività sportiva e il 78% aveva raggiunto il livello pre-infortunio, e gli stessi soggetti a 2 anni raggiungevano tassi del 100% di partecipanti tornati allo sport, di cui il 95% al livello pre-infortunio. Tali valori eccedono quanto riportato da pubblicazioni precedenti, che attestano valori del 77% di RTS ad un anno,^[5] e dell'81% fra i 5 e i 7 anni post-ACLR, di cui solo il 63% al livello pre-infortunio.^[4] Livelli così elevati di RTS e di performance post-ACLR sono solitamente riportati in letteratura in campioni composti da atleti d'élite.^[6,54] Relativamente alla prevenzione delle recidive, l'incidenza di seconda lesione del ACL negli uomini dell'ACL-SPORTS trial è stata pari al 2,5%, significativamente inferiore ai tassi riportati in atleti giovani (23-36%).^[55,11,9] Questi risultati suggeriscono l'efficacia del protocollo riabilitativo proposto nel favorire il rientro in campo e nel prevenire le recidive, tuttavia è doveroso considerare il possibile effetto di altri fattori, come i rigorosi criteri di selezione e progressione applicati prima e durante la riabilitazione. È stato dimostrato che una tempistica di ritorno allo sport adeguatamente calibrata (> 9 mesi) e una progressione riabilitativa basata su criteri clinici oggettivi rappresentano fattori determinanti nella riduzione del rischio di recidiva.^[56]

Altrettanto rilevanti sono le differenze di outcome riportate dagli uomini e dalle donne dell'ACL-SPORT trial. Le donne hanno dimostrato recupero del QI praticamente assente, al contrario degli uomini che, seguendo il medesimo protocollo, hanno avuto risultati significativi.^[32] Inoltre, le donne hanno mostrato tassi di recidiva intorno al 23% a 2 anni dalla ricostruzione,^[34] che, nonostante sia in linea di quella registrata nel resto della letteratura,^[8-10] è molto più alta di quelli riportati dalla controparte maschile dello stesso studio.^[31] Questi risultati suggeriscono che i protocolli riabilitativi attualmente proposti per le atlete femminili potrebbero non rispondere pienamente alle loro specifiche esigenze, evidenziando la necessità di sviluppare studi più mirati e personalizzati per ottimizzare il percorso riabilitativo in questa popolazione.

Per quanto riguarda il training propriocettivo, la letteratura non è concorde. Gli studi inclusi nella revisione che riguardano gli atleti post-ACLR riportano evidenze differenti: Liu-Ambrose e collaboratori sono stati i primi ad indagarne l'efficacia in tale popolazione, non riportando alcuna differenza significativa rispetto alla riabilitazione standard,^[36] mentre Hajouj e collaboratori riportano differenze significative nel JPS, ma non nella funzione e nel dolore rispetto al trattamento di base,^[37] permettendo di ipotizzare un effetto training-specifico senza influenza sugli altri aspetti funzionali. Un articolo del 2007 su popolazione non atletica aveva evidenziato risultati diametralmente opposti, con miglioramento significativamente maggiore della funzione e del dolore rispetto alla riabilitazione standard, ma nessun vantaggio nella propriocezione.^[57] La stessa discordanza è riscontrabile in pubblicazioni che ne valutano l'efficacia nelle prime fasi post ricostruzione.^[58,59] Nonostante la mancanza di riscontri univoci di efficacia del trattamento, la presenza di deficit propriocettivi negli individui che hanno subito ACLR è appurata con certezza in letteratura,^[14,15] ed il ruolo centrale della propriocezione nella stabilità e funzionalità del ginocchio è noto da tempo.^[60] Questo, unitamente alle evidenze emerse a favore del training propriocettivo, ne giustificano e suggeriscono l'utilizzo nella pratica clinica, in particolare per intervenire sugli aspetti neurali, di controllo motorio^[61] e propriocettivi.

Nei riguardi del training pliometrico, i risultati dei tre studi analizzati convergono nel dimostrare che l'inclusione di esercizi pliometrici nelle fasi tardive della riabilitazione

post-ACLR determina un miglioramento significativo delle funzioni neuromuscolari e del controllo motorio, con benefici superiori rispetto ai protocolli basati esclusivamente sul rinforzo muscolare o sull'esercizio eccentrico isolato.^[38-40] Nel lavoro di Tapa e collaboratori il gruppo con pliometria ha mostrato risultati nettamente superiori rispetto al gruppo che ha eseguito solo esercizi di resistenza. I miglioramenti più evidenti sono stati osservati nel tempo di salto, nell'LSI e nel JPS. Il gruppo pliometrico ha inoltre mostrato un incremento significativo dell'equilibrio statico.^[40] Questi risultati trovano piena coerenza con quelli di Kasmi e collaboratori (2021 e 2023), che mettono a confronto il training pliometrico, quello eccentrico e la combinazione di questi. Nei due studi i risultati mostrano che sia negli uomini (Kasmi et al., 2023) sia nelle donne atlete d'élite (Kasmi et al., 2021) il protocollo combinato ha prodotto i maggiori miglioramenti rispetto agli altri gruppi, seguito dal training esclusivamente pliometrico. Negli uomini tali progressi hanno riguardato principalmente la forza isocinetica, i PROs e gli aspetti psicologici legati alla fiducia e alla riduzione della chinesiofobia,^[39] mentre nelle donne sono stati indagati outcome differenti, con guadagni superiori nell'equilibrio dinamico, nella LKS, nell'ACL-RSI e nell'LSI.^[38] Studi precedenti avevano già ottenuto risultati analoghi, mostrando che atleti sottoposti ad ACLR presentano un miglioramento del JPS dopo programmi di allenamento neuromuscolare che includono esercizi di salto.^[62] È interessante analizzare oltre all'effetto training-specifico della pliometria nel miglioramento delle prestazioni di salto, anche l'effetto del training pliometrico su propriocezione ed equilibrio. Questi riscontri portano ad ipotizzare un coinvolgimento non solo della via efferente dell'espressione di forza e reclutamento delle fibre, ma anche dell'integrazione sensoriale afferente. L'allenamento pliometrico, nel suo meccanismo intrinseco di *stretch-shortening cycle* (SSC), stimola costantemente i meccanocettori, gli organi tendinei del Golgi e i fusi neuromuscolari situati attorno al ginocchio. Questa stimolazione continua aumenta la sensibilità delle risposte afferenti e migliora la percezione della posizione articolare.^[63,64] Si può concludere dunque che l'allenamento pliometrico abbia effetti sulle performance di salto, sulla propriocezione e sulla stabilità articolare. La sua integrazione con un allenamento di forza eccentrico ne può esaltare ulteriormente i risultati,^[38,39] probabilmente grazie alla combinazione degli stimoli neurali del SSC e degli stimoli meccanici (modificazioni strutturali del muscolo) e

neurali (reclutamento dei motoneuroni α , *firing* neuronale e modificazioni corticospinali) che vengono attribuiti al training eccentrico.^[65,66] Queste evidenze supportano con forza l'inserimento dell'allenamento pliometrico ed eccentrico nella pratica clinica nelle fasi finali della riabilitazione in vista del RTS.

Late phase NMT

Due articoli della revisione analizzano atleti nella fase finale della riabilitazione. Ghaderi e collaboratori hanno indagato l'effetto del NMT con focus esterno sulla biomeccanica dell'atterraggio, la propriocezione e i punteggi dei PROs. Hanno riscontrato nel gruppo con NMT minore *loading rate* e forza di taglio anteriori sulla tibia. L'allenamento neuromuscolare ha inoltre aumentato la flessione di tronco, anca e ginocchio e ridotto l'abduzione e la rotazione interna del ginocchio rispetto ai partecipanti del gruppo di controllo,^[41] che sono noti per esser variabili biomeccaniche predisponenti alla lesione di ACL.^[67] Inoltre, hanno registrato minori forze di reazione, minori momenti di estensione ed abduzione di ginocchio durante l'atterraggio, tutti fattori impattanti sul carico che subisce l'ACL durante questo gesto motorio.^[68–71] Sono emersi risultati positivi anche sul JPS,^[41] dimostrando un effetto del focus esterno anche sulla propriocezione, la cui importanza nella riabilitazione post-ACLR è già stata discussa precedentemente. La letteratura mostra che la maggior parte delle lesioni di ACL negli atleti dipende da meccanismi *non-contact* o da *indirect contact*,^[72–74] implicando quindi meccanismi che dipendono anche dall'attenzione dell'atleta durante le situazioni di gioco. Intervenire in modo specifico su questo aspetto, rendendo l'atleta in grado di rispondere in modo sicuro alle perturbazioni e ai movimenti repentini senza porre l'attenzione direttamente sull'articolazione, risulta una possibile strategia per ridurre i re-infortuni. Vista la buona qualità metodologica dello studio (*PEDro score* 8/10) risulta fortemente indicato inserire esercizi di controllo motorio con focus esterno nella pratica clinica, verosimilmente già dalle prime fasi per favorire i corretti adattamenti neurali. Niederer e collaboratori non hanno riscontrato differenze a lungo termine fra il gruppo di controllo e il gruppo con il protocollo neuromuscolare Stop-X, basato su controllo neuromotorio, perturbation training e pliometria.^[42] Hanno testato i pazienti misurando la NKSD durante un *drop jump*, tramite analisi di video auto registrati dai pazienti. Visto che entrambi i gruppi hanno raggiunto buoni risultati, senza

differenze significative fra di loro, gli autori ipotizzano che il campione abbia raggiunto un *ceiling-effect*, dati anche i buoni livelli di baseline registrati prima dell'intervento.^[42] Questi risultati portano a considerare la necessità di svolgere training più specifici nelle fasi finali della riabilitazione, che uniscano l'ottimizzazione della performance neuromuscolare (con focus sulla capacità e velocità di reclutamento delle fibre muscolari, come l'RFD)^[75] con un graduale rientro in campo. Le evidenze suggeriscono che la riabilitazione *on-field* debba svolgere da “ponte” tra la riabilitazione clinica e il RTS ^[76,77] anche per i suoi effetti sulla preparazione psicologica degli atleti, che svolge un ruolo chiave per un RTS ottimale e ai livelli per infortunio.^[78,79,16] Questi aspetti non devono sostituire le basi riabilitative come l'allenamento della forza e della qualità del movimento, ma devono essere integrati nelle fasi finali per favorire l'ottimizzazione degli outcome e del RTS.

4.2: Limiti delle evidenze

La letteratura disponibile sull'argomento indagato nella presente revisione presenta numerose limitazioni. I campioni analizzati risultano generalmente di dimensione ridotta, la popolazione maschile è spesso sovrarappresentata nei campioni misti e sono comuni sperimentazioni con soggetti esclusivamente di sesso maschile. Questo limite si inserisce in un contesto in cui è noto che il sesso femminile abbia maggiore rischio di infortunio e reinfortunio e peggiori outcome funzionali a lungo termine.^[80] Un ulteriore limite metodologico, ricorrente nella letteratura di ambito riabilitativo, riguarda l'impossibilità di garantire la cecità dei partecipanti e dei terapisti. La natura stessa degli interventi riabilitativi rende infatti impraticabile un *blinding* completo di entrambe le parti, esponendo i risultati al rischio di *performance bias*. In parte degli studi inclusi, anche i valutatori erano a conoscenza del gruppo di appartenenza dei partecipanti, aumentando le probabilità di *detection bias* dello studio (questa informazione è reperibile nella tabella in Tabella I, item n. 7). Le diverse tipologie di graft, pur frequentemente riportate tra le caratteristiche dei partecipanti e talvolta incluse nei criteri di eleggibilità, non sono state considerate come potenziale variabile in grado di influenzare la necessità o la risposta dei pazienti ai differenti protocolli di NMT. Tuttavia è verosimile che siti di prelievo differenti possano causare alterazioni meccaniche e neuromuscolari diverse tra loro,^[81] incidendo ulteriormente sull'efficacia delle modalità

di riabilitazione. Un'altra criticità risiede nel fatto che, nell'ambito della riabilitazione di ACL, mancano linee di consenso univoche riguardo ai fattori di rischio, alle strategie preventive, alle modalità di trattamento più efficaci e agli strumenti di valutazione più sensibili e specifici per monitorare il recupero funzionale. Gli studi inclusi in questa revisione non sono esenti da questa marcata eterogeneità, in quanto le sperimentazioni incluse impiegano differenti tipologie di NMT, applicate in fasi temporali diverse della riabilitazione e con durate e intensità non comparabili. Anche gli outcome misurati variano considerevolmente tra le diverse pubblicazioni, spaziando da parametri biomeccanici e di propiocezione a misure soggettive di funzione o ritorno allo sport, spesso senza un follow-up uniforme o a lungo termine (fa eccezione in questo senso il gruppo dell'ACL-SPORTS trial).

4.3: Limiti della revisione

La presente revisione è soggetta ad alcune limitazioni. Le fonti consultate sono limitate a tre principali banche dati biomediche: PubMed, PEDro e Cochrane Library. Per massimizzare la sensibilità della ricerca è stato formulato un quesito PICOS a spettro esteso, che ha comportato lo screening e l'inclusione di studi eterogenei per popolazione, intervento e outcome. L'obiettivo era quello di valutare, in senso ampio, il ruolo delle componenti neuromuscolari e di controllo motorio nella riabilitazione post-ACLR negli atleti. Tuttavia tale approccio ha determinato una minore omogeneità degli studi, riducendo la possibilità di formulare un confronto diretto tra gli stessi. A causa della mancanza di una classificazione unanime delle fasi della riabilitazione l'organizzazione degli studi ha richiesto l'adozione di una convenzione temporale qualora i criteri clinici di inclusione non fossero esplicitati nei metodi dello studio. Poiché sia i criteri temporali che clinici rappresentano negli studi una baseline minima di inclusione, non si può escludere che alcuni partecipanti avessero dei livelli di recupero maggiori rispetto alla fase a cui sono stati assegnati nella revisione. Le popolazioni considerate comprendono atleti di tutti i livelli, da atleti di livello élite ad atleti ricreativi. Questa caratteristica può essere considerata un punto di forza, in quanto garantisce eterogeneità dei campioni e permette di generalizzare i risultati alla popolazione atletica in generale, ma riduce la possibilità di confrontare gli studi tra di loro, in quanto in letteratura emerge che gli atleti élite tendono ad avere outcome migliori post ACLR.^[6]

Infine, un ulteriore limite metodologico dell'elaborato risiede nel fatto che è stato redatto da un singolo revisore, la cui esperienza di ricerca è limitata.

4.4: Conclusioni e implicazioni cliniche

Nelle prime fasi dopo la chirurgia di ACLR il *cross training* risulta un metodo efficace negli atleti nel ridurre la perdita di attivazione e di forza del quadricipite nel breve termine, e la sua integrazione clinica può apportare benefici, soprattutto in caso di immobilizzazione forzata dell'arto operato e/o di AMI. Nella *mid phase*, nel gruppo dell'ACL-SPORTS trial il *perturbation training* non ha mostrato vantaggi rispetto ad un protocollo che includa componenti neuromuscolari come agilità e pliometria, dunque il suo utilizzo clinico non è giustificato come aggiunta ad un protocollo già neuromuscolare. Il training propriocettivo risulta molto efficace nel ristabilire la propriocezione, frequentemente alterata post-ACLR e componente essenziale per l'attivazione dei sistemi dinamici di stabilizzazione e del controllo motorio. Non sono emersi, negli studi considerati, effetti del training propriocettivo su altre variabili funzionali, suggerendo che, nonostante la sua utilità clinica, vada inserito all'interno di protocolli più completi. L'allenamento pliometrico nelle fasi più tardive della riabilitazione di ACL (tarda *mid phase* e *late phase*) ha mostrato ottimi risultati, con effetti positivi su forza, equilibrio, salto, propriocezione e prontezza psicologica (PROs) soprattutto se integrato ad un training di forza con focus eccentrico. La pliometria risulta quindi uno strumento clinicamente valido per preparare gli atleti al RTS e migliorarne la funzione neuromuscolare. Non è possibile trarre conclusioni definitive sull'effetto di queste modalità di NMT sul tasso di reinfortunio e sui loro effetti a lungo termine, a causa della mancanza di follow-up a lungo termine nella maggior parte degli studi.

Si può concludere che il NMT sia una componente importante della riabilitazione degli atleti post-ACLR, alla luce delle alterazioni neuromuscolari che questo intervento comporta e dei risultati degli studi analizzati. La letteratura sull'argomento è ricca ed in crescita, tuttavia manca di un filo conduttore comune. Risulta eterogenea in termini di trattamento, posologia, timing e outcome di valutazione. Questa frammentarietà riflette la mancanza di unanimità sulle strategie riabilitative più efficaci per l'ACL, i cui outcome funzionali non sono ancora soddisfacenti. Si sottolinea quindi la necessità di

futuri studi che adottino protocolli più standardizzati per ciascun NMT e set di outcome primari condivisi, con follow-up a lungo termine e una maggiore considerazione delle differenze di genere, poiché le atlete femmine sembrano presentare esigenze e risposte riabilitative differenti rispetto agli uomini.

Legenda abbreviazioni (in ordine alfabetico)

ACL: Legamento Crociato Anteriore; ACLR: Ricostruzione del Legamento Crociato Anteriore; ACL-RSI: Anterior Cruciate Ligament-Return to Sport after Injury Scale; AE: Absolute Error; AMI: Inibizione Muscolare Artrogenica; BESS: Balance Error Scoring System; BMI: Indice di Massa Corporea; CE: Constant Error; Graft BTB: Graft Bone-Patellar tendon-Bone; Graft HT: Graft Hamstring; Graft QT: Graft Rotuleo; HPF: Hamstring Peak Force; IKDC: International Knee Documentation Committee; ILS: Inter Limb Symmetry; KOOS: Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score; KOOS-QoL: KOOS-Quality of Life; KOS-ADLS: Knee Outcome Survey-Activities of Daily Living Scale; LKS: Lysholm Knee Score; LSI: Limb Symmetry Index; MCID: Minimal Clinically Important Difference; MVC: Maximal Volitional Contraction; NKSD: Normalized Knee Separation Distance; NMT: Neuromuscular Training; NRS: Numerical Rating Scale; PeakTT: Peak Torque Time; pKExtA: Peak Knee Extension Angle; pKFA: Peak Knee Flexion Angle; PROs: Patient Reported Outcomes; QI: Quadriceps Index; QPF: Quadriceps Peak Force; RCT: Randomized Controlled Trial; ROM: Range Of Motion; RTS: Return To Sport; SEBT: Star Excursion Balance Test; VAS: Visual Analogue Scale; VE: Variable Error; Y-bal: Y-Balance Test.

BIBLIOGRAFIA

1. Sanders TL, Maradit Kremers H, Bryan AJ, Larson DR, Dahm DL, Levy BA, et al. Incidence of Anterior Cruciate Ligament Tears and Reconstruction: A 21-Year Population-Based Study. *Am J Sports Med* 2016;44(6):1502–7.
2. Krause M, Freudenthaler F, Frosch KH, Achtnich A, Petersen W, Akoto R. Operative Versus Conservative Treatment of Anterior Cruciate Ligament Rupture. *Dtsch Arztebl Int* 2018;115(51–52):855–62.
3. Filbay SR, Dowsett M, Chaker Jomaa M, Rooney J, Sabharwal R, Lucas P, et al. Healing of acute anterior cruciate ligament rupture on MRI and outcomes following non-surgical management with the Cross Bracing Protocol. *Br J Sports Med* 2023;57(23):1490–7.
4. Ardern CL, Taylor NF, Feller JA, Webster KE. Fifty-five per cent return to competitive sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery: an updated systematic review and meta-analysis including aspects of physical functioning and contextual factors. *Br J Sports Med* 2014;48(21):1543–52.
5. Ardern CL, Webster KE, Taylor NF, Feller JA. Return to the preinjury level of competitive sport after anterior cruciate ligament reconstruction surgery: two-thirds of patients have not returned by 12 months after surgery. *Am J Sports Med* 2011;39(3):538–43.

6. Lai CCH, Ardern CL, Feller JA, Webster KE. Eighty-three per cent of elite athletes return to preinjury sport after anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review with meta-analysis of return to sport rates, graft rupture rates and performance outcomes. *Br J Sports Med* 2018;52(2):128–38.
7. Ardern CL. Anterior Cruciate Ligament Reconstruction—Not Exactly a One-Way Ticket Back to the Preinjury Level. *Sports Health* 2015;7(3):224–30.
8. Paterno MV, Rauh MJ, Schmitt LC, Ford KR, Hewett TE. Incidence of contralateral and ipsilateral anterior cruciate ligament (ACL) injury after primary ACL reconstruction and return to sport. *Clin J Sport Med Off J Can Acad Sport Med* 2012;22(2):116–21.
9. Paterno MV, Rauh MJ, Schmitt LC, Ford KR, Hewett TE. Incidence of Second ACL Injuries 2 Years After Primary ACL Reconstruction and Return to Sport. *Am J Sports Med* 2014;42(7):1567–73.
10. Webster KE, Feller JA. Exploring the High Reinjury Rate in Younger Patients Undergoing Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Am J Sports Med* 2016;44(11):2827–32.
11. Wiggins AJ, Grandhi RK, Schneider DK, Stanfield D, Webster KE, Myer GD. Risk of Secondary Injury in Younger Athletes After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review and Meta-analysis. *Am J Sports Med* 2016;44(7):1861–76.
12. Castanharo R, da Luz BS, Bitar AC, D’Elia CO, Castropil W, Duarte M. Males still have limb asymmetries in multijoint movement tasks more than 2 years following anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sci Off J Jpn Orthop Assoc* 2011;16(5):531–5.
13. Paterno MV, Ford KR, Myer GD, Heyl R, Hewett TE. Limb asymmetries in landing and jumping 2 years following anterior cruciate ligament reconstruction. *Clin J Sport Med Off J Can Acad Sport Med* 2007;17(4):258–62.
14. Bonfim TR, Jansen Paccola CA, Barela JA. Proprioceptive and behavior impairments in individuals with anterior cruciate ligament reconstructed knees. *Arch Phys Med Rehabil* 2003;84(8):1217–23.
15. Relph N, Herrington L, Tyson S. The effects of ACL injury on knee proprioception: a meta-analysis. *Physiotherapy* 2014;100(3):187–95.
16. Ardern CL, Kvist J, Webster KE. Psychological Aspects of Anterior Cruciate Ligament Injuries. *Oper Tech Sports Med* 2016;24(1):77–83.
17. Nagelli CV, Webster K, Di Stasi S, Wordeman SC, Hewett TE. The Association of Psychological Readiness to Return to Sport after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction and Hip and Knee Landing Kinematics. *Clin Biomech Bristol Avon* 2019;68:104–8.

18. Denti M, Monteleone M, Berardi A, Panni AS. Anterior cruciate ligament mechanoreceptors. Histologic studies on lesions and reconstruction. *Clin Orthop* 1994;(308):29–32.
19. Risberg MA, Mørk M, Jenssen HK, Holm I. Design and implementation of a neuromuscular training program following anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther* 2001;31(11):620–31.
20. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* 2021;n71.
21. Ouzzani M, Hammady H, Fedorowicz Z, Elmagarmid A. Rayyan—a web and mobile app for systematic reviews. *Syst Rev* 2016;5(1):210.
22. Ahmed KKM, Al Dhubaib BE. Zotero: A bibliographic assistant to researcher. *J Pharmacol Pharmacother* 2011;2(4):303–5.
23. Van Melick N, Van Cingel REH, Brooijmans F, Neeter C, Van Tienen T, Hulleger W, et al. Evidence-based clinical practice update: practice guidelines for anterior cruciate ligament rehabilitation based on a systematic review and multidisciplinary consensus. *Br J Sports Med* 2016;50(24):1506–15.
24. Hartigan E, Axe MJ, Snyder-Mackler L. Perturbation training prior to ACL reconstruction improves gait asymmetries in non-copers. *J Orthop Res Off Publ Orthop Res Soc* 2009;27(6):724–9.
25. Zult T, Gokeler A, van Raay JJAM, Brouwer RW, Zijdwind I, Farthing JP, et al. Cross-education does not accelerate the rehabilitation of neuromuscular functions after ACL reconstruction: a randomized controlled clinical trial. *Eur J Appl Physiol* 2018;118(8):1609–23.
26. Minshull C, Gallacher P, Roberts S, Barnett A, Kuiper JH, Bailey A. Contralateral strength training attenuates muscle performance loss following anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction: a randomised-controlled trial. *Eur J Appl Physiol* 2021;121(12):3551–9.
27. Karimijashni M, Sarvestani FK, Yoosefinejad AK. The Effect of Contralateral Knee Neuromuscular Exercises on Static and Dynamic Balance, Knee Function, and Pain in Athletes Who Underwent Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Single-Blind Randomized Controlled Trial. *J Sport Rehabil* 2023;32(5):524–39.
28. White K, Di Stasi SL, Smith AH, Snyder-Mackler L. Anterior cruciate ligament-specialized post-operative return-to-sports (ACL-SPORTS) training: a randomized control trial. *BMC Musculoskelet Disord* 2013;14:108.
29. Arundale AJH, Cummer K, Capin JJ, Zarzycki R, Snyder-Mackler L. Report of the Clinical and Functional Primary Outcomes in Men of the ACL-SPORTS Trial: Similar Outcomes in Men Receiving Secondary Prevention With and Without

- Perturbation Training 1 and 2 Years After ACL Reconstruction. *Clin Orthop* 2017;475(10):2523–34.
30. Capin JJ, Zarzycki R, Arundale A, Cummer K, Snyder-Mackler L. Report of the Primary Outcomes for Gait Mechanics in Men of the ACL-SPORTS Trial: Secondary Prevention With and Without Perturbation Training Does Not Restore Gait Symmetry in Men 1 or 2 Years After ACL Reconstruction. *Clin Orthop* 2017;475(10):2513–22.
 31. Arundale AJH, Capin JJ, Zarzycki R, Smith AH, Snyder-Mackler L. TWO YEAR ACL REINJURY RATE OF 2.5%: OUTCOMES REPORT OF THE MEN IN A SECONDARY ACL INJURY PREVENTION PROGRAM (ACL-SPORTS). *Int J Sports Phys Ther* 2018;13(3):422–31.
 32. Arundale AJH, Capin JJ, Zarzycki R, Smith A, Snyder-Mackler L. Functional and Patient-Reported Outcomes Improve Over the Course of Rehabilitation: A Secondary Analysis of the ACL-SPORTS Trial. *Sports Health* 2018;10(5):441–52.
 33. Capin JJ, Failla M, Zarzycki R, Dix C, Johnson JL, Smith AH, et al. Superior 2-Year Functional Outcomes Among Young Female Athletes After ACL Reconstruction in 10 Return-to-Sport Training Sessions: Comparison of ACL-SPORTS Randomized Controlled Trial With Delaware-Oslo and MOON Cohorts. *Orthop J Sports Med* 2019;7(8):2325967119861311.
 34. Johnson JL, Capin JJ, Arundale AJH, Zarzycki R, Smith AH, Snyder-Mackler L. A Secondary Injury Prevention Program May Decrease Contralateral Anterior Cruciate Ligament Injuries in Female Athletes: 2-Year Injury Rates in the ACL-SPORTS Randomized Controlled Trial. *J Orthop Sports Phys Ther* 2020;50(9):523–30.
 35. Zarzycki R, Arhos E, Failla M, Capin J, Smith AH, Snyder-Mackler L. Association of the Psychological Response to the ACL-SPORTS Training Program and Self-reported Function at 2 Years After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Am J Sports Med* 2021;49(13):3495–501.
 36. Liu-Ambrose T, Taunton JE, MacIntyre D, McConkey P, Khan KM. The effects of proprioceptive or strength training on the neuromuscular function of the ACL reconstructed knee: a randomized clinical trial. *Scand J Med Sci Sports* 2003;13(2):115–23.
 37. Hajouj E, Hadian MR, Mir SM, Talebian S, Ghazi S. Effects of Innovative Land-based Proprioceptive Training on Knee Joint Position Sense and Function in Athletes with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Randomized Controlled Trial. *Arch Neurosci [Internet]* 2021 [cited 2025 Sept 9];8(1). Available from: <https://brieflands.com/articles/ans-111430>
 38. Kasmi S, Zouhal H, Hammami R, Clark CCT, Hackney AC, Hammami A, et al. The Effects of Eccentric and Plyometric Training Programs and Their Combination

on Stability and the Functional Performance in the Post-ACL-Surgical Rehabilitation Period of Elite Female Athletes. *Front Physiol* 2021;12:688385.

39. Kasmi S, Sariati D, Hammami R, Clark CCT, Chtara M, Hammami A, et al. The effects of different rehabilitation training modalities on isokinetic muscle function and male athletes' psychological status after anterior cruciate ligament reconstructions. *BMC Sports Sci Med Rehabil* 2023;15(1):43.
40. Tapa W, Lertwanich P, Chuensiri N. Effects of Supervised Plyometric Training on Neuromuscular and Knee Functions for Late Phase Rehabilitation Program in Patients with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Randomized Controlled Trial. *Siriraj Med J* 2024;76(6):353–65.
41. Ghaderi M, Letafatkar A, Thomas AC, Keyhani S. Effects of a neuromuscular training program using external focus attention cues in male athletes with anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized clinical trial. *BMC Sports Sci Med Rehabil* 2021;13(1):49.
42. Niederer D, Keller M, Schüttler KF, Schoepp C, Petersen W, Best R, et al. Late-stage rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction: A multicentre randomised controlled trial (PReP). *Ann Phys Rehabil Med* 2024;67(4):101827.
43. De Jong SN, Van Caspel DR, Van Haeff MJ, Saris DBF. Functional Assessment and Muscle Strength Before and After Reconstruction of Chronic Anterior Cruciate Ligament Lesions. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 2007;23(1):21.e1-21.e11.
44. Roewer BD, Di Stasi SL, Snyder-Mackler L. Quadriceps strength and weight acceptance strategies continue to improve two years after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Biomech* 2011;44(10):1948–53.
45. Chmielewski TL, Hurd WJ, Rudolph KS, Axe MJ, Snyder-Mackler L. Perturbation training improves knee kinematics and reduces muscle co-contraction after complete unilateral anterior cruciate ligament rupture. *Phys Ther* 2005;85(8):740–9; discussion 750-754.
46. Paterno MV, Schmitt LC, Ford KR, Rauh MJ, Myer GD, Huang B, et al. Biomechanical Measures during Landing and Postural Stability Predict Second Anterior Cruciate Ligament Injury after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction and Return to Sport. *Am J Sports Med* 2010;38(10):1968–78.
47. Hendy AM, Lamon S. The Cross-Education Phenomenon: Brain and Beyond. *Front Physiol* 2017;8:297.
48. Harput G, Ulusoy B, Yildiz TI, Demirci S, Eraslan L, Turhan E, et al. Cross-education improves quadriceps strength recovery after ACL reconstruction: a randomized controlled trial. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA* 2019;27(1):68–75.

49. Papandreu M, Billis E, Papathanasiou G, Spyropoulos P, Papaioannou N. Cross-Exercise on Quadriceps Deficit after ACL Reconstruction. *J Knee Surg* 2012;26(01):051–8.
50. Hortobágyi T, Lambert NJ, Hill JP. Greater cross education following training with muscle lengthening than shortening. *Med Sci Sports Exerc* 1997;29(1):107.
51. Howatson G, Taylor MB, Rider P, Motawar BR, McNally MP, Solnik S, et al. Ipsilateral motor cortical responses to TMS during lengthening and shortening of the contralateral wrist flexors. *Eur J Neurosci* 2011;33(5):978–90.
52. Pietrosimone B, Lepley AS, Kuenze C, Harkey MS, Hart JM, Blackburn JT, et al. Arthrogenic Muscle Inhibition Following Anterior Cruciate Ligament Injury. *J Sport Rehabil* 2022;31(6):694–706.
53. Liu C, Li S, Li J, Zhang H, Li G, Jiang X. The effects of contralateral limb cross-education training on post-surgical rehabilitation outcomes in patients with anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled trial. *J Orthop Surg* 2025;20(1):118.
54. Waldén M, Hägglund M, Magnusson H, Ekstrand J. Anterior cruciate ligament injury in elite football: a prospective three-cohort study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA* 2011;19(1):11–9.
55. Webster KE, Feller JA, Leigh WB, Richmond AK. Younger patients are at increased risk for graft rupture and contralateral injury after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 2014;42(3):641–7.
56. Grindem H, Snyder-Mackler L, Moksnes H, Engebretsen L, Risberg MA. Simple decision rules can reduce reinjury risk by 84% after ACL reconstruction: the Delaware-Oslo ACL cohort study. *Br J Sports Med* 2016;50(13):804–8.
57. Risberg MA, Holm I, Myklebust G, Engebretsen L. Neuromuscular training versus strength training during first 6 months after anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized clinical trial. *Phys Ther* 2007;87(6):737–50.
58. Cooper RL, Taylor NF, Feller JA. A randomised controlled trial of proprioceptive and balance training after surgical reconstruction of the anterior cruciate ligament. *Res Sports Med Print* 2005;13(3):217–30.
59. Zheng QY, Sun JN, Wang RS, Ma YR, Chen P. Does proprioceptive training improve joint function and psychological readiness in patients after anterior cruciate ligament reconstruction? A randomized controlled trial. *BMC Musculoskelet Disord* 2025;26(1):364.
60. Riemann BL, Lephart SM. The Sensorimotor System, Part II: The Role of Proprioception in Motor Control and Functional Joint Stability. *J Athl Train* 2002;37(1):80–4.

61. Jiang L, Zhang L, Huang W, Zeng Q, Huang G. The effect of proprioception training on knee kinematics after anterior cruciate ligament reconstruction: A randomized control trial. *J Back Musculoskelet Rehabil* 2022;35(5):1085–95.
62. Ghaderi M, Letafatkar A, Almonroeder TG, Keyhani S. Neuromuscular training improves knee proprioception in athletes with a history of anterior cruciate ligament reconstruction: A randomized controlled trial. *Clin Biomech Bristol Avon* 2020;80:105157.
63. Chmielewski TL, Myer GD, Kauffman D, Tillman SM. Plyometric exercise in the rehabilitation of athletes: physiological responses and clinical application. *J Orthop Sports Phys Ther* 2006;36(5):308–19.
64. Han J, Waddington G, Adams R, Anson J, Liu Y. Assessing proprioception: A critical review of methods. *J Sport Health Sci* 2016;5(1):80–90.
65. Lepley LK, Lepley AS, Onate JA, Grooms DR. Eccentric Exercise to Enhance Neuromuscular Control. *Sports Health* 2017;9(4):333–40.
66. Vidmar MF, Baroni BM, Michelin AF, Mezzomo M, Lugokenski R, Pimentel GL, et al. Isokinetic eccentric training is more effective than constant load eccentric training for quadriceps rehabilitation following anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled trial. *Braz J Phys Ther* 2020;24(5):424–32.
67. Tran AA, Gatewood C, Harris AHS, Thompson JA, Dragoo JL. The effect of foot landing position on biomechanical risk factors associated with anterior cruciate ligament injury. *J Exp Orthop* 2016;3(1):13.
68. Bakker R, Tomescu S, Brenneman E, Hangalur G, Laing A, Chandrashekar N. Effect of sagittal plane mechanics on ACL strain during jump landing. *J Orthop Res* 2016;34(9):1636–44.
69. Bates NA, Myer GD, Shearn JT, Hewett TE. Anterior cruciate ligament biomechanics during robotic and mechanical simulations of physiologic and clinical motion tasks: A systematic review and meta-analysis. *Clin Biomech* 2015;30(1):1–13.
70. Bates NA, Nesbitt RJ, Shearn JT, Myer GD, Hewett TE. Knee Abduction Affects Greater Magnitude of Change in ACL and MCL Strains Than Matched Internal Tibial Rotation In Vitro. *Clin Orthop* 2017;475(10):2385–96.
71. Kiapour AM, Kiapour A, Goel VK, Quatman CE, Wordeman SC, Hewett TE, et al. Uni-directional coupling between tibiofemoral frontal and axial plane rotation supports valgus collapse mechanism of ACL injury. *J Biomech* 2015;48(10):1745–51.
72. Ahn J, Choi B, Lee YS, Lee KW, Lee JW, Lee BK. The mechanism and cause of anterior cruciate ligament tear in the Korean military environment. *Knee Surg Relat Res* 2019;31(1):13.

73. Della Villa F, Buckthorpe M, Grassi A, Nabiuzzi A, Tosarelli F, Zaffagnini S, et al. Systematic video analysis of ACL injuries in professional male football (soccer): injury mechanisms, situational patterns and biomechanics study on 134 consecutive cases. *Br J Sports Med* 2020;54(23):1423–32.
74. Grassi A, Smiley SP, Roberti di Sarsina T, Signorelli C, Marcheggiani Muccioli GM, Bondi A, et al. Mechanisms and situations of anterior cruciate ligament injuries in professional male soccer players: a YouTube-based video analysis. *Eur J Orthop Surg Traumatol Orthop Traumatol* 2017;27(7):967–81.
75. Buckthorpe M. Optimising the Late-Stage Rehabilitation and Return-to-Sport Training and Testing Process After ACL Reconstruction. *Sports Med* 2019;49(7):1043–58.
76. Bizzini M, Hancock D, Impellizzeri F. Suggestions from the field for return to sports participation following anterior cruciate ligament reconstruction: soccer. *J Orthop Sports Phys Ther* 2012;42(4):304–12.
77. Della Villa S, Boldrini L, Ricci M, Danelon F, Snyder-Mackler L, Nanni G, et al. Clinical Outcomes and Return-to-Sports Participation of 50 Soccer Players After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Through a Sport-Specific Rehabilitation Protocol. *Sports Health* 2012;4(1):17–24.
78. Langford JL, Webster KE, Feller JA. A prospective longitudinal study to assess psychological changes following anterior cruciate ligament reconstruction surgery. *Br J Sports Med* 2009;43(5):377–81.
79. Arden CL, Webster KE, Taylor NF, Feller JA. Return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery: a systematic review and meta-analysis of the state of play. *Br J Sports Med* 2011;45(7):596–606.
80. Barnett S, Badger GJ, Kiapour A, Yen YM, Henderson R, Freiburger C, et al. Females Have Earlier Muscle Strength and Functional Recovery After Bridge-Enhanced Anterior Cruciate Ligament Repair. *Tissue Eng Part A* 2020;26(13–14):702–11.
81. Adachi N, Ochi M, Uchio Y, Sakai Y, Kuriwaka M, Fujihara A. Harvesting hamstring tendons for ACL reconstruction influences postoperative hamstring muscle performance. *Arch Orthop Trauma Surg* 2003;123(9):460–5.