

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Medicina

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

Corso di Laurea Magistrale in Scienze e Tecniche dell'Attività Motoria

Preventiva e Adattata

Tesi di Laurea:

Prevenzione della Rottura del Legamento Crociato Anteriore:

Approcci Attuali e Prospettive Future

Relatore: Dott.ssa Fabiola Spolaor

Laureando:

Angelo Cenci

Anno Accademico 2023/2024

Indice

Abstract

Introduzione

1. Il Ginocchio: anatomia e funzione

1.1. Struttura anatomica del ginocchio

1.1.1. Muscoli

1.1.2. Menischi

1.1.3. Legamenti

1.1.3.1. Legamento crociato anteriore (LCA)

1.2. Biomeccanica del ginocchio

1.3. Infortuni del ginocchio

2. Il calcio: Performance e Prevenzione

2.1. Performance sportiva

2.2. Prevenzione

2.3. Tipologie di infortuni nei calciatori

2.4. Epidemiologia

2.5. Eziologia

2.6. Lesioni al Legamento Crociato Anteriore

2.6.1. Meccanismi di lesione

2.6.2. Meccanismo di rottura LCA conseguente a trauma non diretto

2.6.3. Patter Situazionale

2.6.4. Il Cambio di direzione

2.7. Tecniche di valutazione

3. Analisi Del Movimento

3.1. Definizione

3.2. Tecniche di Analisi del Movimento

3.2.1. Motion Capture

3.2.2. Stereofotogrammetria

3.2.3. Analisi Video

3.2.4. Sorgenti di errore

3.3. Pedane di Pressione

3.4. Protocolli

- 3.4.1. Protocollo IOR-GAIT
- 3.5. Analisi On Field
 - 3.5.1. Tecnologie utilizzate
 - 3.5.2. Vantaggi dell'analisi on field
 - 3.5.3. Limitazioni e sfide
- 3.6. Variabili Biomeccaniche
 - 3.6.1. Angoli di Flessione ed Estensione
 - 3.6.2. Momenti di Flessione ed Estensione
 - 3.6.3. Momenti di Adduzione e Abduzione
- 4. Proposta di Studio: Materiali e Metodi
 - 4.1. Popolazione dello studio
 - 4.2. Strumentazione e tecnologie
 - 4.3. Protocolli di valutazione
 - 4.3.1. Analisi biomeccanica dei cambi di direzione
 - 4.3.2. Test Funzionali
 - 4.4. Intervento e follow-up
 - 4.5. Analisi statistica
 - 4.6. Validità e limiti dello studio
 - 4.6.1. Strategie per mitigare i limiti
- 5. L'allenamento nella prevenzione delle lesioni LCA
 - 5.1. Forza massima e stabilità articolare
 - 5.2. Forza esplosiva e controllo dinamico
 - 5.3. Risposta neuromuscolare e prevenzione delle lesioni
 - 5.4. Biomeccanica e ottimizzazione del movimento
 - 5.5. Approccio integrato: dalla teoria alla pratica
 - 5.6. Proposte di Allenamento

Bibliografia

Riassunto

Le lesioni del legamento crociato anteriore (LCA) sono sempre più frequenti in ambito sportivo, interessando sia giovani atleti che professionisti. Questi infortuni rappresentano una delle principali cause di interruzione della stagione sportiva e sono associati a conseguenze negative a lungo termine, come un aumento del rischio di recidive e un significativo impatto sulla carriera. La comprensione dei meccanismi di lesione e l'identificazione dei fattori di rischio sono essenziali per lo sviluppo di strategie preventive efficaci.

Questo studio si propone di analizzare le cause e le variabili biomeccaniche e funzionali associate al rischio di lesione del LCA nel calcio, con particolare attenzione ai cambi di direzione a 90°, e fornire indicazioni fondamentali per la progettazione di protocolli di allenamento mirati.

Abstract

Anterior cruciate ligament (ACL) injuries are increasingly common in sports, affecting both young athletes and professionals. These injuries are among the leading causes of interrupted sports seasons and are associated with long-term negative consequences, such as a heightened risk of recurrence and a significant impact on an athlete's career. Understanding the mechanisms of injury and identifying risk factors are essential for developing effective preventive strategies.

This study aims to analyze the causes, as well as the biomechanical and functional variables associated with ACL injury risk in football, with a particular focus on 90° direction changes, and to provide key insights for designing targeted training protocols.

Introduzione

Negli sport di squadra, come ad esempio il calcio, gli infortuni rappresentano un fattore determinante per la carriera degli atleti, influenzando negativamente le loro prestazioni, causando anche effetti negativi a lungo termine come osteoartriti e un aumento delle probabilità di una recidiva (Montalvo, 2019), causando inoltre ripercussioni poi sia del punto di vista psicologico personale che sulla squadra e l'intera società.

Secondo la **Howden's European Football Injury Index** per la stagione 2021/2022, nei principali cinque campionati europei (Bundesliga, English Premier League, La Liga, Ligue 1 e Serie A), si è osservato un aumento degli infortuni del 20%, con un costo per i club di oltre mezzo miliardo di sterline. Questo incremento è stato osservato anche tra i giovani atleti, in particolare nel periodo post-COVID, il che suggerisce l'urgenza di interventi più efficaci in termini di prevenzione. Un infortunio per un giovane atleta non rappresenta solo un danno individuale — come evidenziato dallo studio di Hewett & Johnson (2010), che ha identificato nelle lesioni gravi una delle principali cause di abbandono dello sport — ma può avere ripercussioni su tutta la squadra e la società.

Numerosi studi, tra cui quelli di **Carling, McCall, Le Gall, & Dupont (2015)** e **Hägglund et al. (2013)**, hanno dimostrato una correlazione significativa tra una minore incidenza di infortuni e una migliore posizione finale in classifica. Questi risultati evidenziano quanto sia essenziale trovare un equilibrio tra la ricerca della performance sportiva e la prevenzione degli infortuni, attraverso sistemi di monitoraggio e programmi di prevenzione specifici.

La stessa UEFA (Union of European Football Associations) negli ultimi anni sta lanciando diverse campagne di sensibilizzazione per ridurre il numero di infortuni in campo.

Studi epidemiologici hanno evidenziato che, oltre al danno individuale, la frequenza degli infortuni può influire direttamente sui risultati sportivi delle squadre: una minore incidenza di lesioni è infatti correlata a un miglioramento della classifica finale.

Tra gli infortuni più gravi e diffusi nel calcio vi è la lesione del legamento crociato anteriore (LCA), che richiede lunghi periodi di riabilitazione e ha conseguenze a lungo termine sia sul piano fisico che psicologico; proprio per questo motivo, sempre di più negli ultimi anni si è concentrata l'attenzione sull'analisi dei meccanismi di lesione del legamento crociato anteriore e sullo studio di metodi e programmi di prevenzione.

Secondo la letteratura, gli infortuni al LCA non possono essere completamente prevenuti ma è possibile ridurre il rischio di incidenza attraverso protocolli di allenamento atti a diminuire

lo stress a cui è sottoposto il ginocchio e quindi il legamento e tutte le altre strutture (Sawacha, 2020).

Il ginocchio è spesso sottoposto a sollecitazioni elevate durante azioni come accelerazioni e decelerazioni, cambi di direzione, salti e atterraggi. Attraverso l'analisi biomeccanica, è possibile comprendere meglio i meccanismi che predispongono a tali infortuni e sviluppare strategie preventive per ridurre il rischio.

Lo studio si propone di identificare ed analizzare i fattori biomeccanici di rischio durante l'esecuzione di cambi di direzione a 90° (un movimento sport-specifico tipico del calcio che più sottopone il LCA a stress e quindi rischio lesione) Inoltre, mira a dimostrare come un programma di allenamento specifico e multifattoriale possa contribuire in modo significativo alla riduzione dell'incidenza di tali infortuni.

Capitolo 1

Il Ginocchio: Anatomia e Funzione

1.1 Struttura anatomica del ginocchio

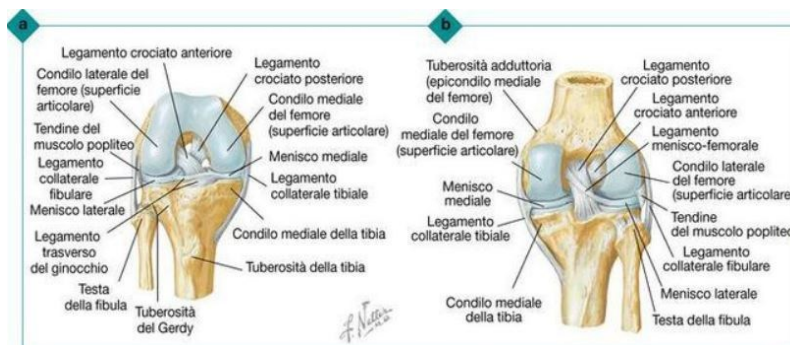
Il ginocchio è una delle articolazioni più grandi e strutturalmente più complesse del corpo umano e svolge un ruolo fondamentale nella locomozione e nella stabilità del corpo. Si tratta di una diartrosi sinoviale di tipo ginglimo (o a cerniera), che consente principalmente i movimenti di flessione ed estensione ma anche una limitata rotazione interna ed esterna della tibia rispetto al femore quando l'articolazione è flessa.

È costituita da tre ossa principali: il femore, la tibia e la rotula. Queste strutture ossee formano due articolazioni distinte: la femoro-tibiale (tra femore e tibia) e la femoro-rotulea (tra femore e rotula). La rotula (o patella), che scorre nella parte anteriore del ginocchio all'interno del tendine del muscolo quadricipite, svolge un ruolo importante nella dinamica del ginocchio, poiché migliora l'efficienza del movimento. Posteriormente la rotula si articola con la faccia patellare del femore.

Troviamo inoltre due menischi, fissati sull'eminanza intercondiloidea della tibia e costituiti da cartilagine, sono coinvolti nei movimenti della tibia rispetto al femore, spostandosi anteriormente nell'estensione, posteriormente nella flessione e asimmetricamente nelle rotazioni. L'articolazione del ginocchio è avvolta da una capsula articolare, internamente rivestita dalla membrana sinoviale (Barbatelli G., 2018).

La cartilagine e i tendini giocano un ruolo cruciale nella struttura e nella funzionalità del ginocchio. La cartilagine articolare, un tessuto liscio e resistente che riveste le estremità del femore, della tibia e della rotula, permette movimenti fluidi riducendo l'attrito tra le superfici ossee e assorbendo gli impatti. Insieme alla cartilagine meniscale, che fornisce ammortizzazione e stabilità, protegge l'articolazione da usura e danni.

I tendini, invece, sono robuste strutture fibrose che collegano i muscoli alle ossa, permettendo la trasmissione della forza necessaria per i movimenti del ginocchio. Tra i più rilevanti, il tendine rotuleo e quello del quadricipite, responsabili dell'estensione, e i tendini dei muscoli ischiocrurali, che agiscono nella flessione e nella stabilità articolare. La coordinazione tra cartilagine e tendini garantisce al ginocchio una cinematica efficiente e sicura, essenziale per attività quotidiane e sportive.



2.1.1 I muscoli

La muscolatura del ginocchio gioca un ruolo cruciale nel supporto e nel movimento di questa articolazione, intervenendo sia nella stabilità dinamica sia nell'assorbimento delle forze durante attività come corsa, salti e cambi di direzione.

I principali gruppi muscolari coinvolti sono:

→ Muscoli estensori del ginocchio:

- **Muscolo Quadricipite Femorale:** è il principale estensore del ginocchio e comprende quattro ventri muscolari: **retto femorale**, **vasto laterale**, **vasto mediale** e **vasto intermedio**. Questo gruppo muscolare stabilizza la **rotula** (o patella) e assicura l'estensione del ginocchio durante attività come correre, saltare e calciare.
 - Il **retto femorale** è l'unico capo biarticolare del quadricipite e partecipa sia all'estensione del ginocchio che alla flessione dell'anca aumentando il controllo della gamba nella fase di slancio durante la corsa.

→ Muscoli Flessori del Ginocchio:

- **Muscoli Ischiocrurali:** o **muscoli posteriori della coscia** includono **bicipite femorale**, **semitendinoso** e **semimembranoso**. Svolgono un'importante funzione di flessione del ginocchio e sono coinvolti nella **rotazione interna ed esterna della gamba**. Hanno anche un ruolo stabilizzante, opponendosi al movimento in avanti della tibia rispetto al femore, funzione fondamentale per prevenire l'eccessivo stress sul **LCA** durante movimenti di arresto improvviso e cambi di direzione.
 - **Bicipite femorale:** situato nella parte posteriore della coscia, contribuisce alla flessione del ginocchio e alla rotazione esterna della gamba.
- **Semitendinoso e semimembranoso:** situati medialmente, favoriscono la flessione e la rotazione interna del ginocchio.
- **Gastrocnemio:** parte del muscolo tricipite della sura, svolge un ruolo importante sia nella flessione del ginocchio che nella stabilizzazione del movimento.

→ Muscoli Adduttori e stabilizzatori

- **Soleo:** sebbene non agisca direttamente sul ginocchio, la sua funzione di supporto alla cavaglia e alla postura contribuisce alla stabilità complessiva dell'arto inferiore, riducendo il rischio di cedimenti improvvisi del ginocchio durante movimenti dinamici e di carico.
- **Gracile e sartorio:** muscoli sottili e lunghi, supportano la stabilità mediale del ginocchio e sono importanti per i movimenti di rotazione interna della tibia, stabilizzando l'articolazione durante attività che prevedono cambi di direzione e movimenti laterali. Aiutano anche a mantenere l'equilibrio del ginocchio nelle posizioni di flessione.
- **Popliteo:** un piccolo muscolo situato nella fossa poplitea, contribuisce alla flessione e rotazione interna del ginocchio ed è fondamentale per lo sblocco dell'articolazione durante l'inizio della flessione.
- **Adduttori:** Stabilizzano medialmente l'anca e impediscono eccessive forze di valgismo sul ginocchio. Un'attivazione efficace degli adduttori può prevenire il collasso mediale del ginocchio durante movimenti come i cambi di direzione.
- **Abduttori:** Stabilizzano lateralmente l'anca e aiutano a mantenere un allineamento neutro del ginocchio. Una debolezza negli abduttori, come nel medio gluteo, può portare a un'inclinazione pelvica e a un collasso in valgo del ginocchio, aumentando il rischio di lesioni come la rottura del legamento crociato anteriore (LCA).

2.1.2 I menischi

I menischi sono strutture cartilaginee a forma di "C" situate all'interno dell'articolazione del ginocchio, tra il femore e la tibia. Ogni ginocchio ha due menischi: il menisco mediale (interno) e il menisco laterale (esterno). La loro funzione principale è assorbire gli urti, distribuire il peso corporeo e stabilizzare l'articolazione del ginocchio durante i movimenti. Questi tessuti riducono inoltre l'attrito e aiutano a prevenire danni alla cartilagine articolare, agendo come una sorta di "cuscinetto" tra le ossa. I menischi sono costituiti da fibrocartilagine, una struttura che combina fibre di collagene e altre componenti che la rendono resistente e al tempo stesso elastica. La loro vascolarizzazione è limitata: solo la zona periferica dei menischi riceve un buon apporto di sangue, mentre la zona centrale è più povera di vasi sanguigni, il che rende difficoltosa la guarigione delle lesioni in questa area.

2.1.3 I Legamenti

I legamenti sono bande di tessuto connettivo fibroso che collegano le ossa tra di loro, stabilizzando le articolazioni e limitandone i movimenti eccessivi. Essi sono fondamentali per garantire la stabilità e il corretto funzionamento delle articolazioni, assorbendo e distribuendo le forze che agiscono sulle articolazioni durante l'attività fisica.

- Legamento Crociato Anteriore (LCA): collega la parte anteriore della tibia con la parte posteriore del femore e previene il movimento in avanti eccessivo della tibia rispetto al femore. È spesso soggetto a lesioni, soprattutto negli sport che richiedono rapidi cambi di direzione.
- Legamento Crociato Posteriore (LCP): collega la parte posteriore della tibia con il femore e impedisce alla tibia di spostarsi troppo indietro rispetto al femore. È meno soggetto a lesioni rispetto al LCA, ma importante per la stabilità del ginocchio.
- Legamento Collaterale Mediale (LCM): si trova sul lato interno del ginocchio e previene movimenti laterali eccessivi verso l'interno, stabilizzando il ginocchio rispetto alle forze che spingono lateralmente.
- Legamento Collaterale Laterale (LCL): situato sul lato esterno, stabilizza il ginocchio rispetto alle forze laterali, prevenendo movimenti eccessivi verso l'esterno.

2.1.3.1. Legamento crociato anteriore (LCA)

Il LCA è un robusto legamento intra-articolare che si estende dalla superficie anteriore della tibia all'interno dell'articolazione del ginocchio, fino a inserirsi sulla parte posteriore del condilo laterale del femore; è situato al centro dell'articolazione del ginocchio e ha una funzione essenziale nella stabilizzazione: impedisce la traslazione anteriore della tibia rispetto al femore e prevenire l'eccessiva rotazione interna ed esterna del ginocchio durante i movimenti complessi, come i salti e i cambi di direzione (cdd). È composto da due fasci principali: il fascio antero-mediale e il fascio postero-laterale, i quali lavorano insieme per garantire la stabilità durante l'intera gamma di movimenti dell'articolazione.

La sua posizione centrale e la sua struttura a forma di fascio lo rendono particolarmente vulnerabile agli infortuni. A causa della sua importanza biomeccanica, la rottura comprometterebbe gravemente la stabilità del ginocchio, portando a episodi di "cedimento" o instabilità funzionale che possono rendere difficoltoso per l'atleta eseguire azioni come correre, cambiare direzione rapidamente o atterrare dopo un salto.

1.2 Biomeccanica del ginocchio

La biomeccanica del ginocchio è cruciale per comprendere la funzionalità articolare e per identificare i fattori biomeccanici che possono influenzare il rischio di lesioni, soprattutto nel contesto sportivo. Il ginocchio, articolazione di tipo condiloartrosi con funzioni simili a un ginglino angolare, permette movimenti principalmente di flesso-estensione e rotazione interna/esterna, soprattutto in flessione.

Il ginocchio può essere definito come un'articolazione dotata di sei gradi di libertà di movimento: tre gradi di movimenti rotatori (flesso/estensione, adduzione/abduzione, intrarotazione/extrarotazione) e tre gradi di movimento traslatorio (antero/posteriore, medio/laterale, trazione/compressione). Dal punto di vista osteocinematico attivamente può compiere solo 2 gradi di movimento: flesso/estensione e rotazione esterna/interna, questo perché strutture anatomiche come i legamenti e i menischi stabilizzano l'articolazione, limitando i movimenti passivi (traslazione e adduzione/abduzione). Questi tessuti controllano i movimenti "parassiti", riducendo il rischio di instabilità o danni.

si osservano meccanismi combinati di rotolamento e scivolamento tra i condili femorali e i piatti tibiali, con il legamento crociato anteriore e quello posteriore che giocano ruoli chiave nel limitare lo scivolamento e nel mantenere la stabilità articolare. Questi legamenti guidano anche i movimenti complessi come la *screw-home rotation*, una rotazione automatica del ginocchio che aumenta la stabilità in estensione.

In condizioni di flessione, la rotazione assiale è massima a 90° e si riduce progressivamente verso l'estensione, durante la quale i legamenti collaterali e crociati si tendono, limitando i movimenti rotatori. Questa configurazione stabilizza il ginocchio nei movimenti di peso, come la corsa e il salto, ma può risultare vulnerabile durante cambi rapidi di direzione o movimenti torsionali, comuni nel calcio.

1.3 Infortuni del Ginocchio

Il ginocchio è particolarmente vulnerabile agli infortuni a causa della sua anatomia e delle elevate sollecitazioni biomeccaniche cui è sottoposto. Gli infortuni del ginocchio possono essere suddivisi in traumatici e da sovraccarico, con diverse implicazioni a seconda della loro natura, gravità e meccanismo d'insorgenza.

Tra le lesioni traumatiche, le più comuni sono le lesioni:

- al **legamento crociato anteriore (LCA)** sono tra le più gravi e invalidanti, spesso causate da movimenti di torsione, bruschi cambi di direzione, atterraggi mal controllati o impatti diretti. Similmente,
- al **legamento crociato posteriore (LCP)** può essere lesionato, anche se meno frequentemente, in seguito a traumi ad alta energia come impatti frontali o cadute.
- ai **legamenti collaterali** (mediale e laterale) sono spesso soggetti a stiramenti o rotture in seguito a forze applicate lateralmente o medialmente al ginocchio, come durante scontri sportivi.
- **meniscali**, invece, coinvolgono i menischi mediale e laterale, le strutture fibrocartilaginee che agiscono da ammortizzatori, e sono frequentemente associate a torsioni del ginocchio sotto carico o a traumi ripetuti, con conseguenze che spaziano dal dolore alla compromissione dell'articolazione:
- le **fratture intra-articolari**, come quelle della rotula, dei condili femorali o del piatto tibiale, che si verificano in seguito a traumi diretti o cadute.

Le patologie da sovraccarico comprendono invece condizioni legate a stress meccanici ripetuti e microtraumi cumulativi. Tra queste:

- la **sindrome della bandelletta ileotibiale** è comune nei corridori e negli sportivi che compiono movimenti ripetitivi di flessione ed estensione del ginocchio;
- la **tendinopatia rotulea**, nota anche come “ginocchio del saltatore”, colpisce spesso atleti coinvolti in discipline che prevedono salti o scatti esplosivi;
- **condropatia femoro-rotulea**, una degenerazione della cartilagine articolare dietro la rotula, è frequente nei giovani sportivi e negli individui con alterazioni biomeccaniche del ginocchio.

A lungo termine, i traumi ripetuti e il sovraccarico possono portare allo sviluppo di **osteoartrosi del ginocchio**, una patologia degenerativa caratterizzata dalla progressiva perdita di cartilagine e da un'inflammatione cronica, che compromette seriamente la funzionalità articolare. Tra le altre condizioni, si annoverano anche le **borsiti** (inflammazioni delle borse sinoviali) e i **conflitti articolari**, spesso secondari a movimenti ripetitivi o posture scorrette.

La complessità e la varietà delle lesioni del ginocchio richiedono un approccio multidisciplinare per una diagnosi accurata, che consideri non solo il trattamento immediato, ma anche la prevenzione delle recidive e il ripristino delle funzionalità articolari

Capitolo 2

Il calcio: Performance e Prevenzione

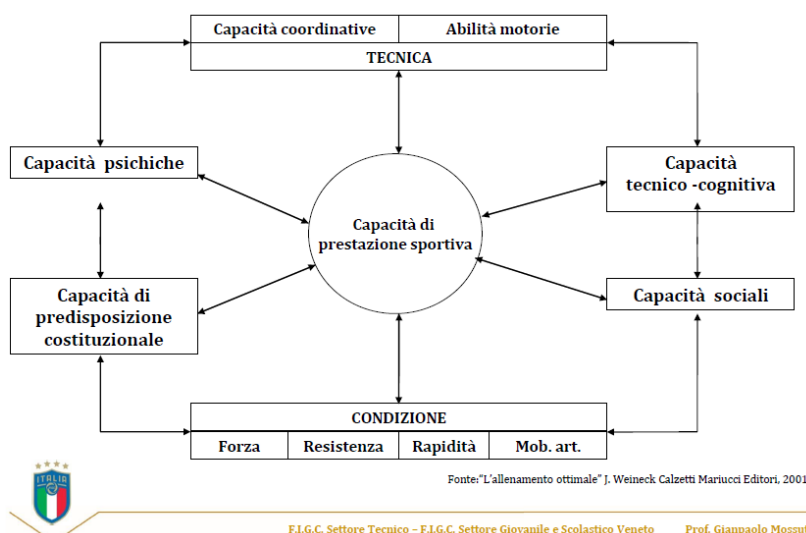
Il calcio è uno sport complesso e dinamico, che richiede un alto livello di abilità tecnica, tattica e fisica. Gli aspetti tecnici fondamentali includono il controllo della palla, i passaggi, il dribbling, il tiro e il contrasto. Questi elementi sono eseguiti in modo preciso e rapido, spesso sotto pressione e in condizioni di movimento costante. La capacità di effettuare cambi di direzione veloci e precisi è essenziale per creare spazio, superare gli avversari e mantenere il possesso palla. Inoltre, tecniche come il passaggio e il tiro richiedono una perfetta coordinazione tra gambe, tronco e braccia, ottimizzando l'efficacia e riducendo il rischio di infortuni.

Nel calcio, ma come in tutti gli sport, la prestazione sportiva e la prevenzione degli infortuni sono due ambiti strettamente interconnessi. Da un lato, l'obiettivo è ottenere il massimo rendimento dell'atleta durante le competizioni, dall'altro, occorre minimizzare i rischi di infortunio, garantendo longevità e salute. L'ottimizzazione della performance e la prevenzione degli infortuni richiedono un approccio interdisciplinare che combini competenze scientifiche e pratiche: l'analisi biomeccanica, la valutazione dei carichi di lavoro e la preparazione fisica e atletica mirano a migliorare l'efficienza motoria dell'atleta, riducendo al contempo i rischi di lesioni.

Oggi, in molti sport, gli atleti raggiungono performance eccezionali e questo viene ancor più esaltato nel calcio, quando vediamo fuoriclasse come Youssef En-Nesyri che nella partita del mondiale Marocco-Portogallo del 2022 salta 2,78m o Sven Botman del Newcastle che durante una partita raggiunge i 39,21 km/h di picco massimo, numeri che probabilmente qualche anno fa li avrebbero portati a vincere le Olimpiadi. Tuttavia, insieme al miglioramento delle performance, è essenziale considerare la salute dell'atleta, poiché la carriera sportiva tende a prolungarsi diventa quindi cruciale preservare la condizione fisica del giocatore il più a lungo possibile, adottando misure preventive per ridurre il rischio di infortuni.

2.1 Performance sportiva

Nel calcio, la performance è un risultato della combinazione di molteplici fattori come le capacità condizionali (velocità, resistenza, forza, agilità, flessibilità) e capacità coordinative. Le capacità fisiche, come forza, resistenza e velocità, supportano le azioni esplosive necessarie per scatti, cambi di direzione rapidi e duelli in campo, mentre la resistenza aerobica permette di mantenere l'intensità per tutta la durata della partita. La qualità della prestazione è influenzata anche dalla tecnica individuale, ovvero l'insieme delle abilità che un calciatore sviluppa per controllare il pallone e interagire con esso in modo efficace durante il gioco. Le abilità tecniche (controllo di palla, passaggi e dribbling) sono determinanti per mantenere il possesso e creare occasioni offensive, mentre la precisione nel tiro può fare la differenza nel finalizzare le azioni. Migliorare la tecnica individuale è cruciale per consentire ai giocatori di prendere decisioni rapide, evitare l'avversario, mantenere il possesso di palla e creare opportunità di gioco.



Dal punto di vista tattico, la capacità di leggere il gioco, il posizionamento e la comunicazione con i compagni consentono di adattarsi agli schemi di squadra e di rispondere rapidamente alle situazioni di gioco. La preparazione mentale gioca un ruolo chiave, poiché la concentrazione, la resilienza e la gestione dello stress consentono al calciatore di mantenere il focus e di reagire positivamente agli errori. Infine, la performance è ottimizzata da un'attenta gestione del recupero, attraverso un'alimentazione adeguata, l'idratazione e il riposo per prevenire infortuni e mantenere il corpo al massimo della forma. In ambito professionale, queste aree vengono sviluppate con piani di allenamento personalizzati e una periodizzazione strategica, garantendo che ogni giocatore sia preparato sia fisicamente che mentalmente per affrontare le sfide della competizione.

Per valutare la performance nel calcio esistono una varietà di metodi che analizzano le capacità fisiche, tecniche, tattiche e mentali dei giocatori, permettendo di ottenere una visione completa delle loro competenze e aree di miglioramento.

I test fisici nel calcio sono fondamentali per valutare le capacità atletiche (resistenza, forza, velocità, agilità e potenza) dei giocatori e per sviluppare programmi di allenamento mirati.

Alcuni dei test fisici più utilizzati.

- Test di Resistenza Aerobica (Yo-Yo Intermittent Recovery Test);
- Test di Velocità;
- Test di Forza e Potenza Muscolare (Salto Verticale, CMJ, back squat);
- Test di Agilità (Agility T-Test);
- Test di Sprint Ripetuti (RAST e RSA);
- Test della Flessibilità e Mobilità (Sit and Reach).

2.2 Prevenzione

La prevenzione nello sport e nel calcio è essenziale per ridurre il rischio di infortuni, migliorare le prestazioni e mantenere la salute a lungo termine degli atleti. La prevenzione si basa su una serie di misure e interventi mirati a ridurre il rischio di infortuni attraverso strategie personalizzate in base al tipo di sport, alle esigenze dell'atleta e ai rischi specifici legati alle dinamiche di gioco.

Nel calcio sono già stati validati diversi programmi efficaci non solo nel ridurre il numero degli infortuni, ma anche per migliorare la performance (Crompton et al., 2017; Graham-Smith et al., 2013; Gribble et al., 2012)

Le strategie preventive possono essere suddivise in diverse categorie, ciascuna mirata a diversi aspetti della condizione fisica, tecnica e psicologica degli atleti.

- **Valutazione Preliminare:** Una valutazione completa prima dell'inizio della stagione è cruciale, include l'analisi della storia clinica, test funzionali e valutazioni della mobilità, forza e stabilità;
- **Allenamento della Forza e della Resistenza:** Il rafforzamento muscolare è essenziale per prevenire infortuni, specialmente nelle articolazioni più sollecitate come caviglie, ginocchia e anche. L'allenamento della resistenza riduce la stanchezza

muscolare, che è una causa comune di infortuni sul campo verso la fine delle partite o delle sessioni di allenamento intense;

- **Riscaldamento e Defaticamento:** Un riscaldamento specifico e ben strutturato è fondamentale per preparare il corpo a sforzi elevati, migliorare la circolazione e ridurre il rischio di lesioni. L'applicazione a medio-lungo termine di un riscaldamento dinamico strutturato che integra approcci di prevenzione degli infortuni e di prestazione può ridurre l'incidenza degli infortuni e migliorare la prestazione dei giocatori (Kinkerdall et al., 2010; Mojtaba Asgari et al., 2022)
- **Educazione alla Tecnica Corretta:** Molti infortuni sono causati da una tecnica scorretta; quindi, insegnare e praticare i movimenti giusti riduce il rischio. Nel calcio, la corretta esecuzione del tiro, del contrasto e della corsa laterale, per esempio, può prevenire lesioni ai muscoli e ai legamenti;
- **Recupero e Gestione della Fatica:** è una parte essenziale della prevenzione: dormire a sufficienza, seguire una dieta equilibrata e programmare giornate di recupero attivo possono prevenire sovraccarichi e affaticamenti eccessivi;
- **Flessibilità e Mobilità:** Mantenere una buona flessibilità e mobilità, soprattutto per le articolazioni, aiuta a prevenire infortuni causati da movimenti forzati o poco fluidi. Esercizi di stretching dinamico prima della partita e stretching statico alla fine possono mantenere il range di movimento e ridurre il rischio di contratture;
- **Monitoraggio Costante e Personalizzazione:** Ogni atleta ha esigenze diverse; quindi, monitorare e adattare il programma di allenamento e recupero è essenziale per una prevenzione efficace.

2.4 Tipologie di infortuni nei calciatori

Il calcio è uno sport dinamico caratterizzato da un'elevata intensità e da movimenti rapidi e imprevedibili che comprendono accelerazioni, decelerazioni, cambi di direzione, salti e atterraggi ma anche da contrasti. Questi movimenti rendono i giocatori vulnerabili a una grande varietà di infortuni muscoloscheletrici. Secondo le statistiche, gli infortuni agli arti inferiori sono i più comuni nel calcio, rappresentando circa il 70-80% di tutti i traumi riportati dagli atleti. Le lesioni possono variare in gravità e includono stiramenti muscolari, distorsioni, contusioni e fratture. In medicina sportiva viene definito come infortunio un

evento traumatico acuto dovuto ad un trasferimento di energia che supera la capacità dell'organismo di mantenere la sua integrità strutturale o funzionale (Fuller et Al, 2007), avvenuto in allenamento o in partita e che comporta l'assenza da allenamenti e/o partite per almeno 1 giorno. Gli infortuni sportivi si classificano secondo tre differenti caratteristiche:

- Severità;
- Acuto o cronico;
- Trauma diretto o indiretto.

Le principali categorie di infortuni che si riscontrano sono:

- **Infortuni muscolari:** includono stiramenti, strappi e contusioni, spesso agli arti inferiori, come i quadricipiti, i muscoli posteriori della coscia e i polpacci. Sono generalmente causati da sforzi intensi o movimenti rapidi e improvvisi.
- **Infortuni ai legamenti:** tra i più comuni e gravi è la rottura del LCA, ma sono frequenti anche le lesioni ai legamenti collaterali del ginocchio e ai legamenti della caviglia. Avvengono spesso a causa di torsioni, cambi di direzione e contatti diretti.
- **Infortuni tendinei:** come il tendine d'Achille, sono sottoposti a stress elevati, specialmente durante i salti, gli sprint e le fermate improvvise. Tendiniti e rotture parziali o complete dei tendini sono comuni in queste circostanze.
- **Infortuni articolari:** Le articolazioni di ginocchio, caviglia e anca sono particolarmente vulnerabili. L'instabilità articolare o i traumi ripetuti possono portare a distorsioni e lussazioni, soprattutto in caso di contatto fisico o atterraggi scorretti.
- **Infortuni ossei:** Le fratture sono meno comuni ma possono verificarsi a seguito di traumi diretti, come contrasti particolarmente duri o impatti. Le fratture più frequenti riguardano il piede, la tibia e il perone.
- **Lesioni della cartilagine:** solitamente queste lesioni riguardano la cartilagine del ginocchio e dell'anca e sono spesso il risultato di sovraccarichi e traumi ripetuti, che possono degenerare in condizioni più gravi, come l'osteoartrosi.
- **Lesioni da sovraccarico:** Gli infortuni da sovraccarico sono causati dalla ripetizione continua di movimenti specifici, e includono condizioni come la sindrome della bandelletta ileotibiale, la periostite tibiale (infiammazione della membrana esterna delle ossa della tibia) e varie forme di tendinite.

- **Lesioni cerebrali traumatiche:** Anche se meno frequenti, le commozioni cerebrali sono un rischio nei colpi di testa o negli impatti accidentali con altri giocatori o il terreno.

2.5 Epidemiologia lesione LCA

Le lesioni legamentose e meniscali sono frequenti, soprattutto in ambito sportivo. L'incidenza di **rottura del LCA** nella popolazione europea (di età compresa tra i 10 e i 64 anni) è pari a 81 casi all'anno su 100.000 persone (Brukner P et al., 2012).

Una ricerca realizzata nel 2018 da un gruppo di ricercatori australiani (Zbrojkiewicz D et al., 2018) mostra come la distribuzione delle lesioni del LCA interessi maggiormente la popolazione di giovane età e, in particolare, per il genere maschile l'età compresa tra i 20 e i 24 anni mentre per quello femminile la fascia d'età tra i 15 e i 19 anni, ovviamente l'incidenza maggiore sulla popolazione si ha nell'ambito sportivo dove, ogni anno, il 3% degli atleti a livello amatoriale e il 15% degli atleti di alto livello subisce un infortunio.

Gli sport più a rischio sono quelli caratterizzati da impatti ad alta energia col terreno (es. atterraggi monopodalici), da improvvise decelerazioni e cambi di direzioni come nel calcio, il basket, la pallavolo e lo sci. Inoltre, le femmine riportano un rischio relativo (RR) tra le 2.4 e le 9.7 volte superiore rispetto ai maschi nei medesimi sport

Il calcio moderno rientra a tutti gli effetti tra gli sport che più presenta il più alto rischio di incorrere in un evento lesivo; secondo alcuni studi (Ekstrand et al., 2011, 2013) a livello professionistico il rischio è addirittura di circa 1000 volte superiore ad altre attività.

Un autorevole studio dell'UEFA riporta un'incidenza di 0,013 infortuni per 1.000 ore di allenamento e 0,309 infortuni per 1.000 ore di gioco, con i tassi più alti tra i calciatori professionisti (Welden et al., 2016). Una squadra di 25 giocatori può aspettarsi un infortunio al LCA ogni due anni. In termini di prevalenza il 10-11% dei giocatori di serie A (stagione 2005) aveva subito un infortunio al LCA (Roi, 2005). Alcuni dati preliminari della UEFA parlano di una possibile tendenza in aumento nel calcio professionistico, mentre ricerche effettuate in diverse parti del mondo mostrano quanto questo infortunio sia sempre più frequente tra i giovani atleti (Zbrojkiewicz et al., 2018; Weitz et al., 2019).

Le statistiche degli ultimi anni hanno evidenziato come il mese di ottobre rappresenti un periodo critico per le lesioni al legamento crociato anteriore. Questo fenomeno è legato a

diversi fattori: il ritorno dalla pausa con allenamenti e competizioni ravvicinate, spesso senza adeguati periodi di recupero e senza una sufficiente preparazione fisica pre-campionato e le condizioni del terreno di gioco, che iniziano a deteriorarsi a causa dei cambiamenti climatici autunnali.

2.6 Eziologia lesione LCA

L'eziologia degli infortuni nel calcio è multifattoriale e deriva dall'interazione tra fattori biomeccanici, neuromuscolari e ambientali. Il rischio di infortuni è elevato a causa della natura intensa e variabile del gioco.

I principali fattori eziologici comprendono:

- **Fattori biomeccanici:** Movimenti come cambi di direzione, frenate e atterraggi possono sovraccaricare le articolazioni, in particolare ginocchio e caviglia. Angoli articolari inappropriati, instabilità dinamica e scarsa tecnica possono aumentare lo stress sul LCA e sulle strutture circostanti.
- **Fattori neuromuscolari:** Una scarsa attivazione dei muscoli stabilizzatori (es. quadricipiti e ischiocrurali) può compromettere il controllo motorio e aumentare il rischio di lesioni. Deficit neuromuscolari possono portare a una diminuzione della capacità di assorbire correttamente le forze di impatto, esponendo il ginocchio a un rischio maggiore di infortunio.
- **Fattori esterni:** Superfici di gioco, calzature, condizioni meteorologiche e contatto con altri giocatori influenzano significativamente l'incidenza degli infortuni. Ad esempio, terreni duri o irregolari e calzature non idonee possono contribuire a stress aggiuntivi sulle articolazioni.
- **Fattori individuali:** Anatomia, età, sesso e livello di preparazione fisica giocano un ruolo rilevante. Inoltre, esiste una predisposizione genetica che può influenzare la resistenza dei tessuti e il rischio di lesioni.

2.7 Lesioni al Legamento Crociato Anteriore

2.7.1 Meccanismi di lesione

Esistono tre principali meccanismi di lesione dell'LCA, distinti in base all'interazione con l'avversario ed il contesto in cui si trova il giocatore:

- Lesioni da contatto diretto (CD): costituiscono circa il 10-12% delle lesioni totali. Il contatto può verificarsi sia durante azioni difensive che offensive e solitamente avviene quando viene colpito il compartimento laterale del ginocchio, che provocando così un movimento di valgo forzato. Altre volte il contatto è anteriore, causando un'iperestensione e quindi una lesione della stabilità centrale (pivot shift). Le forze applicate direttamente sul ginocchio aumentano la probabilità di lesione strutturale, soprattutto quando l'articolazione è in posizioni non biomeccanicamente favorevoli;
- Lesioni da contatto indiretto (CI): Rappresentano circa il 44% delle lesioni. Si verifica in seguito a un'interazione non diretta con un avversario, dove il contatto può essere a livello del tronco o della pelvi, causando uno spostamento improvviso del baricentro e una perturbazione meccanica che riduce il controllo dell'equilibrio e il supporto dell'arto. Questo sovraccarico può indurre un cambiamento improvviso e non voluto del movimento, generando una torsione innaturale del ginocchio che porta alla rottura del LCA;
- Lesioni da non contatto (NC): Avvengono nel 44% dei casi, particolarmente comuni durante azioni difensive e spesso in seguito a una perturbazione neuro-cognitiva, ad esempio una distrazione o una decisione improvvisa. La ricerca ha dimostrato che questi infortuni possono verificarsi circa 200 ms prima del contatto con il terreno, momento in cui una perturbazione esterna causa un ritardo nelle risposte propriocettive e di controllo neuromuscolare. Ciò provoca un atterraggio o un appoggio con l'arto in una posizione biomeccanicamente svantaggiosa, che aumenta significativamente il rischio di lesione del LCA.

Secondo i dati riportati da Brophy et al. (2015), la frequenza di questi meccanismi varia anche in base al genere e al contesto di gioco. Nel calcio maschile, l'85% delle lesioni è attribuibile a queste tre categorie, mentre nel femminile si raggiunge il 90%, con un'incidenza particolarmente elevata durante le azioni difensive (87% contro il 63% del maschile).

2.7.2 Meccanismo di rottura LCA conseguente a trauma non diretto

Esaminiamo il meccanismo più comune di rottura del legamento crociato anteriore, che deriva da un trauma non diretto. I movimenti a rischio di lesione, dovuti a un aumento non fisiologico dei momenti articolari.

- **Valgismo-Rotazione Esterna:** Durante questi traumi, la tibia viene spinta in valgismo (abduzione) e in rotazione esterna. Questo meccanismo provoca lesioni in due fasi: inizialmente coinvolge il fascio superficiale del legamento collaterale mediale, il fascio profondo del collaterale interno e il legamento posteriore obliquo di Hughston. Se il trauma non si esaurisce, può verificarsi una sub-lussazione del piatto tibiale mediale, causando la rottura del legamento crociato anteriore.
- **Varismo-Rotazione Interna:** in alcune situazioni, come durante una caduta successiva a un salto o a un cambio di direzione, il piede rimane fisso a terra mentre il ginocchio si sposta in varismo (adduzione) con rotazione interna della tibia rispetto al femore. Ciò provoca una sub-lussazione del piatto tibiale laterale, causando la rottura del legamento crociato anteriore. Questa lesione si verifica in due fasi, con la rottura del legamento crociato anteriore come primo passo, seguito dal coinvolgimento secondario del compartimento capsulo-legamentoso periferico laterale.
- **Iperestensione:** può verificarsi in varie situazioni, come nel tentativo di calcio a vuoto, nel cadere da un salto con il ginocchio esteso o durante il cambio di marcia dell'automobile. In questa situazione, il legamento crociato anteriore viene tagliato dal femore (più precisamente dalla gola intercondiloidea). I pazienti con lesioni al LCA oltre ad una instabilità generale del ginocchio hanno la sensazione che il ginocchio tenda a scivolare indietro.

2.7.3. Patter Situazionali

L'analisi delle situazioni di gioco evidenzia come il rischio di infortunio del LCA nel calcio vari a seconda delle azioni e delle dinamiche di interazione tra i giocatori.

I principali scenari di gioco associati a infortuni del LCA:

- Pressing/Tackling: Gli infortuni in questa situazione sono tipicamente di tipo NC e si verificano durante decelerazioni e cambi di direzione improvvisi. Questi movimenti avvengono mentre il giocatore si avvicina rapidamente all'avversario in un contesto difensivo. Spesso l'infortunio è influenzato da una perturbazione neuro-cognitiva: la

rapidità della decisione e del movimento può generare una riduzione del controllo neuromuscolare, aumentando il rischio di lesione del LCA.

- Tackled: In questa situazione, che avviene soprattutto durante azioni difensive, l'infortunio è generalmente causato da un'interazione di contatto indiretto, come un impatto a livello di tronco o pelvi, che destabilizza il giocatore. La perturbazione meccanica risultante può causare uno spostamento improvviso del baricentro e una perdita di controllo, predisponendo il ginocchio a una torsione e a un potenziale danno al LCA.
- Recupero dell'equilibrio dopo aver calciato: Questo è un meccanismo tipicamente senza contatto, in cui il giocatore si infortuna subito dopo aver colpito il pallone. L'infortunio si verifica durante il contatto con il terreno mentre il giocatore tenta di riequilibrarsi, spesso a causa di un contatto atipico della parte superiore del corpo con il suolo. È una comune tra le calciatrici, probabilmente a causa di una diversa distribuzione della massa corporea e di meccanismi di stabilizzazione posturale.
- Atterraggio da un salto alto: Questa situazione si verifica solitamente dopo un colpo di testa o una presa alta da parte dei portieri. Descritto da Walden come uno dei tre principali meccanismi di infortunio, tuttavia, risulta meno comune nel contesto del calcio italiano, specialmente tra le calciatrici, dove i dati preliminari indicano che è un meccanismo sottorappresentato rispetto al calcio maschile. In questa situazione, l'instabilità post-atterraggio e un posizionamento inadeguato dell'arto inferiore possono provocare un eccessivo stress sul LCA.

2.7.4 Il cambio di direzione nel calcio

Il **cambio di direzione** è una tecnica fondamentale che permette ai giocatori di adattarsi rapidamente alle dinamiche di gioco. La capacità di cambiare direzione in modo rapido e preciso è essenziale per evitare marcature, creare spazi e rispondere prontamente alle azioni degli avversari, migliorando l'efficacia sul campo e riducendo il rischio di infortuni.

Nel corso di un incontro di calcio di campionato sono stati registrati in media 728 ± 48 cambi di direzione di cui 631 ± 41 (87%) e 96 ± 7 (13%) effettuati con cambi di direzione rispettivamente pari a $30-90^\circ$ e $90-180^\circ$ ($p < 0.0001$), quello più frequente risultò essere quello a $30-60^\circ$ (69%). I cdd a $60-90^\circ$, $90-120^\circ$, $120-150^\circ$ e $150-180^\circ$ risultarono

rispettivamente essere il 17, 6, 4 e 3% del totale. Il numero di cdd effettuati a 30-60° è risultato significativamente superiore a quelli prodotti nelle restanti categorie ($p < 0.001$).

I cdd effettuati a 60-90° risultarono significativamente superiore a quelli effettuati a 90-120°, 120-150° e 150-180° ($p < 0.01$) e la frequenza a 90-120° è risultata significativamente superiore a quella di quelli effettuati a 12-150 e 150-180° ($p < 0.01$). (Castagna et al., 2012)

Il cambio di direzione a 90° nel calcio è una tecnica essenziale per eseguire virate rapide, mantenere il controllo della palla e rispondere alle pressioni dell'avversario. Questo movimento richiede l'attivazione simultanea di diverse articolazioni e gruppi muscolari, nonché una biomeccanica precisa per assicurare un cambio di direzione efficace e rapido.

Esecuzione del Cambio di Direzione a 90°

1. Avvicinamento:

- Il giocatore si avvicina al punto di cambio di direzione con passi controllati. Durante questa fase, prepara il corpo abbassando il centro di gravità tramite una leggera flessione delle ginocchia e un'inclinazione del busto in avanti.

2. Fase di Decelerazione:

- Prima di cambiare direzione, il giocatore decelera rapidamente. Questa fase è fondamentale per ridurre l'inerzia in avanti e creare una base stabile per il cambio di direzione.
- La decelerazione avviene grazie all'attivazione dei muscoli posteriori della coscia (ischiocrurali) e del quadricipite.

3. Rotazione del Corpo e Spinta:

- Per eseguire la rotazione di 90°, il giocatore ruota il tronco e l'anca verso la nuova direzione, con il piede esterno (quello lontano dalla nuova direzione) che agisce come punto di spinta.
- Il piede esterno viene posizionato leggermente all'esterno per consentire la spinta laterale necessaria. Questo piede produce la forza necessaria per cambiare direzione grazie alla spinta esercitata dai muscoli abduttori dell'anca, dai glutei e dai polpacci (soprattutto il gastrocnemio).

4. Posizionamento del Piede Interno:

- Dopo la spinta, il piede interno (più vicino alla nuova direzione) stabilizza il movimento. Agisce come un punto di controllo, assorbendo la forza generata e stabilizzando il corpo.

- Durante questa fase, i muscoli stabilizzatori del ginocchio e della caviglia, come il quadricipite e il soleo, lavorano per mantenere l'equilibrio.

5. Ripresa della Velocità:

- Con la nuova direzione impostata, il giocatore accelera, aiutato dai muscoli della coscia, dei polpacci e dei flessori dell'anca. Il busto è orientato verso la nuova direzione, e i primi passi di accelerazione sono corti e rapidi per riprendere velocità in modo graduale.

Biomeccanica del Movimento

Il cambio di direzione a 90° sfrutta movimenti rapidi e potenti che coinvolgono la torsione dell'anca e del busto, l'abduzione e adduzione delle gambe, e una forte flessione plantare nella fase di spinta. La biomeccanica del movimento richiede una coordinazione precisa tra:

- **Forza di spinta:** generata dal piede esterno, che produce la forza laterale per rompere l'inerzia e avviare il cambio di direzione.
- **Controllo e stabilità:** garantiti dal piede interno, che assorbe il carico e stabilizza il corpo dopo il cambio di direzione.
- **Rotazione del tronco e dell'anca:** essenziale per indirizzare il corpo nella nuova direzione.

Articolazioni Coinvolte

- **Anca:** Ruota e si flette per orientare la gamba nella nuova direzione. L'anca del piede esterno effettua un movimento di abduzione (allontanamento dalla linea mediana) mentre quella interna stabilizza il movimento.
- **Ginocchio:** Si flette durante la preparazione e supporta la decelerazione; durante la spinta e l'accelerazione, agisce come ammortizzatore assorbendo il carico.
- **Caviglia:** Fornisce stabilità, supportando la flessione plantare nel piede esterno durante la spinta e mantenendo la posizione durante l'assorbimento dell'impatto del piede interno.

Muscoli Coinvolti

- **Glutei (Gluteo massimo e medio):** Forniscono la forza principale per la spinta laterale e supportano la stabilità dell'anca.
- **Ischiocrurali (posteriori della coscia):** Coinvolti nella decelerazione, aiutano a stabilizzare il ginocchio.

- **Quadricipite:** Stabilizza il ginocchio e contribuisce alla decelerazione e alla ripresa della velocità.
- **Polpacci (Gastrocnemio e Soleo):** Attivano la flessione plantare per generare la spinta e mantengono la stabilità nella caviglia.
- **Adduttori e Abduttori dell'anca:** Gli adduttori controllano il movimento di avvicinamento, mentre gli abduttori (come il gluteo medio) generano la forza laterale necessaria per il cambio di direzione.

Il cambio di direzione a 90° permette ai calciatori di mantenere il controllo della palla, evitare gli avversari e sfruttare gli spazi liberi in campo. La corretta esecuzione di questo movimento richiede un allenamento specifico per sviluppare forza, equilibrio e coordinazione, prevenendo così il rischio di infortuni a caviglie, ginocchia e anche.

2.7 Tecniche di Valutazione

Le tecniche di valutazione rappresentano uno strumento fondamentale per l'identificazione dei fattori di rischio legati agli infortuni nel calcio, con particolare attenzione alle lesioni del legamento crociato anteriore (LCA). L'adozione di approcci basati sull'analisi biomeccanica e funzionale consente di individuare pattern di movimento alterati, deficit muscolari e anomalie posturali, rendendo la valutazione dell'atleta una componente chiave per prevenire eventuali infortuni. L'obiettivo principale di tali valutazioni è prevedere e prevenire possibili lesioni attraverso un approccio personalizzato, integrando molteplici test per ottenere un quadro dettagliato delle condizioni fisiche e biomeccaniche dell'atleta. Tuttavia, il corpo umano è un sistema complesso e dinamico, e le condizioni sportive aumentano ulteriormente la variabilità, rendendo difficile prevedere in modo certo gli infortuni futuri basandosi esclusivamente su test di screening.

Nonostante ciò, l'esecuzione di una serie di test di screening può comunque fornire informazioni clinicamente rilevanti sui fattori di rischio, contribuendo alla formulazione di misure preventive mirate (Schweizer, 2022). Un approccio personalizzato e basato sull'integrazione di dati provenienti da diverse tecniche di valutazione rimane essenziale per la protezione della salute degli atleti e la riduzione delle recidive.

Alcuni dei test più utilizzati per una valutazione preventiva nel calcio:

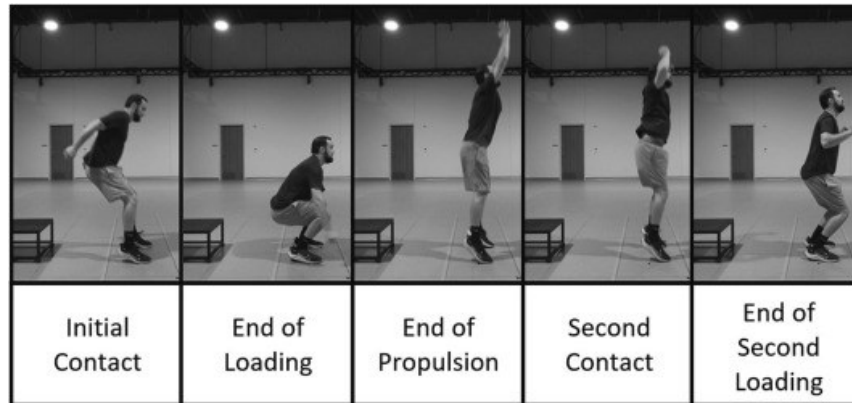
- **Valutazione della forza muscolare:** test isometrici o isocinetici per i principali gruppi muscolari degli arti aiutano a identificare asimmetrie di forza che potrebbero aumentare il rischio di infortunio, specialmente a carico del ginocchio e delle caviglie.
 - o Back squat;
 - o SJ, DJ, CMJ;
 - o Test di bosco.
 - o Dinamometria isocinetica
- **Test di mobilità articolare e flessibilità:** valutazioni della mobilità per le articolazioni dell'anca, ginocchio e caviglia sono utili per rilevare rigidità o limitazioni che potrebbero interferire con i movimenti del calciatore, favorendo il rischio di lesioni.
 - o Sit and Reach: questo test misura la flessibilità della parte bassa della schiena e dei muscoli posteriori della coscia (ischiocrurali)
 - o Thomas Test: valuta la flessibilità dell'anca
 - o Test di mobilità della caviglia (Ankle Dorsiflexion Lunge Test): misura la mobilità in dorsiflessione della caviglia
 - o Test di rotazione interna ed esterna dell'anca: essenziale per i movimenti laterali e i cambi di direzione tipici del calcio
 - o Back Scratch Test: valuta la mobilità della spalla, che, anche se meno coinvolta nel calcio, è comunque importante per i movimenti di equilibrio e per ridurre lo stress durante i salti e i contatti.
 - o FMS (Functional Movement Screen): batteria di test che valuta la mobilità, la stabilità e il controllo motorio dell'atleta in vari movimenti funzionali.
- **Test di stabilità e controllo neuromuscolare:** utilizzati per valutare la capacità di controllo e stabilità del giocatore su una singola gamba. Una buona stabilità e controllo motorio sono fondamentali per ridurre il rischio di infortuni da sovraccarico o da movimenti improvvisi.
 - o Star excursion balance test/y balance test (sebt/ybt): test funzionale utilizzato per valutare l'equilibrio dinamico e la stabilità degli arti inferiori
 - o Single leg squat
 - o Landing Error Scoring System (LESS): questo test valuta la capacità di atterrare in modo controllato da un salto.

- **Test di reattività e cambi di direzione:** valutano la rapidità e l'efficienza nei cambi di direzione, fondamentali per l'agilità sul campo. Questo tipo di valutazione può identificare eventuali deficit che aumentano il rischio di lesioni durante i movimenti laterali e rotatori.
 - o T-Test Agility
 - o Illinois Agility Test
- **Valutazione della forza eccentrica:** vengono spesso utilizzati per valutare la forza eccentrica dei muscoli posteriori della coscia. La forza eccentrica è fondamentale per la stabilità del ginocchio, in particolare per prevenire lesioni al legamento crociato anteriore (LCA).
 - o Nordic Hamstring Exercise
- **Analisi Biomeccanica:** effettuata attraverso sistemi avanzati di motion capture (in laboratorio) o di videoanalisi (in campo), consente di misurare con precisione gli angoli di movimento (anca ginocchio, caviglia), le forze generate e la cinematica articolare durante specifici gesti atletici, come i cambi di direzione, i salti e le frenate.

1. Drop Vertical Jump Test (DVJ)

- **Scopo:** Identificare i pattern di atterraggio potenzialmente pericolosi per il legamento crociato anteriore (LCA), in particolare il valgo dinamico del ginocchio. Questo test è ampiamente utilizzato per valutare la biomeccanica del salto e dell'atterraggio, spesso associati a lesioni non traumatiche del LCA.
- **Procedura:**
 1. L'atleta si posiziona su un box alto 30-40 cm.
 2. Senza saltare, si lascia cadere dal box atterrando su entrambi i piedi.
 3. Immediatamente dopo l'atterraggio, esegue un salto verticale il più in alto possibile.
- **Parametri Analizzati:**
 - o **Angoli articolari:** Flessione di anca e ginocchio durante l'atterraggio (minore flessione può indicare rischio).
 - o **Allineamento del ginocchio:** Valgo dinamico, ovvero la tendenza del ginocchio a collassare verso l'interno, che aumenta il rischio di stress sul LCA.
 - o **Asimmetria:** Differenze tra arti inferiori nel carico o nel movimento.

- **Forze di reazione al suolo:** Analizzate attraverso piattaforme di forza per valutare il modo in cui l'atleta assorbe l'impatto.
- **Utilità:** Fornisce informazioni dettagliate sui deficit di controllo neuromuscolare e sulla biomeccanica del movimento, utili per la prevenzione delle lesioni.



2. 90° Cutting Maneuver Test

- **Scopo:** Esaminare la biomeccanica dei cambi di direzione rapidi, uno dei movimenti più comuni nel calcio e tra i principali responsabili delle lesioni non traumatiche del LCA.

- **Procedura:**

1. L'atleta inizia una corsa lineare verso un segnale visivo o un cono posizionato.
2. Al raggiungimento del punto di riferimento, esegue un cambio di direzione di 90°, spostandosi lateralmente o diagonalmente verso una nuova direzione.
3. Il movimento deve essere rapido e naturale, simulando l'azione di gioco.



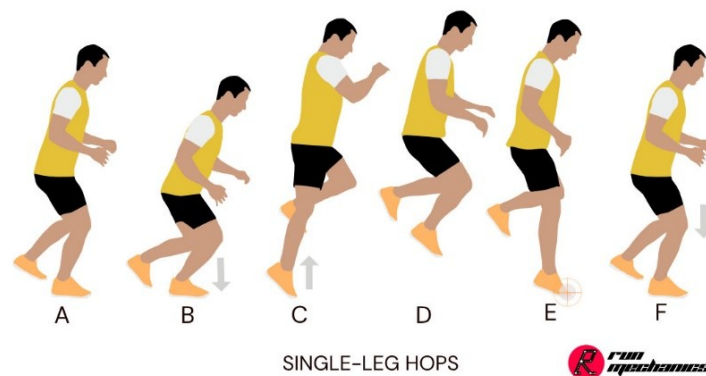
- **Parametri Analizzati:**

- **Angoli articolari:** Rotazione interna/esterna e flessione-estensione di anca, ginocchio e caviglia durante la fase di decelerazione e spinta.
- **Valgo dinamico:** Collasso del ginocchio verso l'interno durante il cambio di direzione.
- **Carico e distribuzione delle forze:** Analizzati tramite piattaforme di forza o sensori inerziali per identificare asimmetrie o sovraccarichi.

- **Tempo di contatto al suolo:** Valutato per evidenziare eventuali inefficienze nel movimento.
- **Utilità:** Permette di identificare schemi motori a rischio e deficit di forza o controllo neuromuscolare legati al movimento specifico del calcio.

3. Single-Leg Hop for Distance

- **Scopo:** Misurare la forza esplosiva, la stabilità dinamica e la capacità di assorbimento delle forze durante l’atterraggio su un arto singolo, individuando eventuali asimmetrie tra gli arti inferiori.
- **Procedura:**
 1. L’atleta si posiziona su una sola gamba, mantenendo l’altra sollevata.
 2. Esegue un salto in avanti cercando di coprire la massima distanza possibile senza perdere l’equilibrio.
 3. L’atterraggio deve avvenire sullo stesso arto utilizzato per il salto, mantenendo stabilità per almeno 2-3 secondi.
- **Parametri Analizzati:**
 - **Distanza del salto:** Indicatore della forza esplosiva.
 - **Angoli articolari:** Flessione e allineamento del ginocchio e della caviglia durante l’atterraggio.
 - **Stabilità dinamica:** Capacità di mantenere l’equilibrio dopo l’atterraggio.
 - **Asimmetrie tra arti:** Differenze nella distanza di salto o nella stabilità tra arto dominante e non dominante.
- **Utilità:** Questo test è semplice da eseguire ma fornisce informazioni cruciali su forza, controllo neuromuscolare e rischio di lesioni. Può essere utilizzato per monitorare il recupero post-infortunio e per la prevenzione.



Capitolo 3

Analisi del Movimento

3.1 Definizione

L'analisi del movimento in biomeccanica è lo studio scientifico di come gli esseri viventi si muovono, con particolare attenzione ai movimenti umani. Comprende l'osservazione e la misurazione dei movimenti del corpo e delle forze coinvolte, come l'interazione tra muscoli, ossa, articolazioni e il sistema nervoso. L'obiettivo è quello di capire le leggi fisiche che governano il movimento umano e applicare queste conoscenze per migliorare le prestazioni fisiche, prevenire infortuni, riabilitare il movimento e ottimizzare la tecnica in attività sportive e quotidiane.

Questa disciplina usa strumenti come telecamere ad alta velocità, sistemi di tracciamento del movimento, pedane di forza, e software di modellazione per raccogliere dati precisi sui movimenti e le forze che li causano. I dati raccolti possono essere analizzati per valutare la postura, la velocità, l'accelerazione e altri aspetti dinamici del movimento, facilitando interventi di allenamento, riabilitazione o ottimizzazione della performance.

Possiamo dire l'**analisi del movimento** è una sorta di esame non invasivo che valuta ogni singolo movimento nella sua quantità e qualità.

L'analisi del movimento comprende:

- L'analisi della cinematica: valuta posizione, velocità e accelerazione di un'articolazione o dell'intera catena cinetica coinvolta durante un task specifico.
- L'analisi della cinetica: misura le forze espresse per ottenere un determinato movimento.
- L'analisi con l'elettromiografia di superficie: registra l'attività elettrica legata alla contrazione muscolare e studia le variazioni quantitative e qualitative dei potenziali d'azione.

L'analisi del movimento coinvolge una vasta gamma di grandezze misurabili, strumenti complessi e metodologie diversificate. I sistemi avanzati per questa analisi si basano su una rete di dispositivi interconnessi, ognuno dei quali è progettato per esaminare aspetti specifici del movimento. In questo studio, ci concentreremo in particolare sui sistemi e sui sensori utilizzati.

3.2 Tecniche di Analisi del Movimento

3.2.1 Motion Capture

La **motion capture (mocap**, in italiano “cattura del movimento”) è una tecnologia avanzata che cattura e digitalizza il movimento di corpi o oggetti, permettendo di trasferire dati di movimento in un ambiente digitale e consentendo di riprodurre fedelmente i movimenti registrati su modelli 3D.

Utilizzata principalmente in settori come: cinema, videogiochi e animazione; trova un gradevole impiego anche in ambito militare, medico e sportivo.

Nel contesto sportivo, è fondamentale non solo per sviluppare programmi riabilitativi altamente personalizzati e mirati, ma anche per studiare quei movimenti ripetitivi che comportano un alto rischio di infortunio consentendo così di creare programmi correttivi o di rinforzo specifici riducendo il rischio di lesioni e migliorando la performance.

Infine, è possibile eseguire un'analisi posturale e valutare la presenza di posture scorrette che a lungo termine potrebbero portare a sovraccarichi strutturali, causando dolori cronici e maggiore probabilità di incorrere in infortuni.

I sistemi di **motion capture** si possono classificare in base alla tecnologia utilizzata per rilevare e registrare il movimento. Ognuno di questi sistemi ha caratteristiche specifiche e viene scelto in base all'applicazione desiderata:

- Sistemi a marcatori ottici: utilizzano fotocamere per rilevare marcatori posizionati sul corpo o sull'oggetto. I marcatori possono essere riflettenti o a LED attivi.
- Sistemi senza marcatori (markerless): non richiedono marcatori fisici; al loro posto, si basano su algoritmi di visione artificiale per tracciare le caratteristiche naturali del corpo. (Utilizzato in questo studio)
- Sistemi inerziali: utilizzano sensori inerziali (IMU) come accelerometri e giroscopi attaccati al corpo per rilevare il movimento. Sono privi di fotocamere e basano il rilevamento sulla misurazione dell'accelerazione e della rotazione.
- Sistemi magnetici: utilizzano campi magnetici per tracciare i movimenti. I sensori rilevano i cambiamenti nei campi magnetici causati dal movimento del corpo.
- Sistemi meccanici: utilizzano una struttura esterna, spesso tipo esoscheletro, attaccata al corpo che registra i movimenti delle articolazioni attraverso sensori meccanici.
- Sistemi ibridi: combinano due o più tecnologie per sfruttare i vantaggi di ciascuna.

3.2.2 Stereofotogrammetria

La **stereofotogrammetria** è una tecnica di misura e analisi basata sull'acquisizione di immagini da diverse angolazioni, utilizzata per ottenere informazioni tridimensionali di un oggetto o di un corpo nello spazio. Si fonda sull'uso di due o più fotocamere sincronizzate che catturano simultaneamente l'oggetto da angolazioni differenti, permettendo di ricostruirne la forma e il movimento con grande precisione.

Le telecamere proiettano un fascio ad infrarossi che vengono rifratti da specifici marcatori (marker), posizionati su punti anatomici (punti di repere).

Una volta posizionati i marker secondo determinati protocolli, seguirà l'acquisizione facendo eseguire al soggetto i movimenti che si vuole analizzare.

La ricostruzione della posizione dei *marker* avviene attraverso software che elaborano i dati acquisiti a partire dalle coordinate bidimensionali degli stessi. Ogni marker deve essere visto da almeno due telecamere. Più sono le telecamere più sarà precisa la ricostruzione.

L'elaborazione delle immagini acquisite avviene in diverse fasi (Cappello A., 2003):

- Sogliatura: è la tecnica utilizzata per elaborare le immagini e per semplificare e migliorare l'analisi dei dati; dopo l'acquisizione viene eseguita una filtrazione da possibili gradienti di illuminazione. In pratica, consiste nel trasformare un'immagine in scala di grigi in un'immagine binaria (composta solo da bianco e nero) stabilendo un valore di "soglia" che separa i pixel chiari da quelli scuri;
- Blob analysis: consiste nell'analisi delle macchie cromatiche presenti nell'immagine per separare quelle utili (che effettivamente costituiscono i marker) da quelle inutili (riflessi) che verranno rimosse. Questo è possibile perché le informazioni dei marker (forma, dimensioni e numero dei pixel) sono note;
- Calibrazione: è un passaggio fondamentale per assicurare che le fotocamere utilizzate siano accuratamente interconnesse ed allineate con il sistema definito. Per far ciò è necessario per stabilire i parametri geometrici e le proprietà ottiche delle fotocamere così da garantire che la ricostruzione 3D degli oggetti sia precisa. I parametri sono: interni (lunghezza focale, coordinate del punto principale P) ed esterni (posizione del sistema di riferimento della Telecamera rispetto al Sistema, Trasformazioni Prospettiche). Può essere Intrinseca ed Estrinseca;

- Triangolazione: è un principio fondamentale che permette di ricostruire la posizione tridimensionale di un punto nello spazio, grazie a ciò è possibile sapere la distanza e la posizione esatta di un punto osservato da angolazioni diverse;
- Tracking: calcola le traiettorie dei marcatori assegnando un nome a ciascuno di essi in ogni istante di tempo.

3.2.3 Analisi Video

L'analisi video è una tecnica utilizzata per analizzare, misurare e studiare il movimento attraverso la registrazione video, permette inoltre di ottenere informazioni sulla cinematica anche senza l'utilizzo dei marker.

Questa metodologia ha riscontrato un grande interesse per la sua versatilità nell'utilizzo e per i ridotti tempi di preparazione rispetto ai sistemi optoelettronici, consentendo le acquisizioni direttamente sul campo da gioco e senza l'ingombro dei marcatori così da poter analizzare situazioni dinamiche altrimenti difficili in laboratorio.

Come funziona:

1. **Registrazione**: Le telecamere, spesso multiple e posizionate in nodo preciso, registrano il soggetto in movimento da diverse angolazioni, consentendo una visione completa e tridimensionale;
2. **Elaborazione delle immagini**: I video acquisiti vengono importati in un software di analisi, vengono segnati i punti di repere (secondo il protocollo scelto), il software calcola quindi le posizioni dei punti di interesse fotogramma per fotogramma;
3. **Analisi cinematica**: Utilizzando i dati acquisiti, il software trova la posizione, la velocità e l'accelerazione dei vari segmenti corporei;
4. **Interpretazione dei dati**: I dati elaborati vengono utilizzati per studiare specifiche caratteristiche del movimento, come la postura, la tecnica sportiva, o l'analisi biomeccanica, a seconda del contesto dell'analisi.

L'analisi video del movimento prevede diverse fasi, ognuna delle quali è fondamentale per ottenere dati accurati e dettagliati sul movimento. Ecco un riepilogo delle fasi principali:

- Calibrazione: La calibrazione è necessaria per stabilire la relazione spaziale tra le telecamere e il volume di acquisizione. Rispetto alla stereofotogrammetria, in questa fase si utilizza un oggetto di dimensioni conosciute. Questo metodo consente di

ottenere i parametri della **calibrazione intrinseca** (caratteristiche interne della fotocamera, come la lunghezza focale e la distorsione dell'obiettivo) e della **calibrazione estrinseca** (relazione spaziale tra le telecamere e il volume di acquisizione). Viene utilizzata una scacchiera, posizionata al centro e deve essere visibile da tutte le telecamere, per ottenere le coordinate di ogni punto nel sistema di riferimento globale rispetto a quello della telecamera.

- Tracking: Il tracking, o tracciamento, riguarda il rilevamento e la registrazione dei movimenti del soggetto. Può avvenire in due modalità principali:
 - o **Tracking automatico**: Attraverso algoritmi di intelligenza artificiale, il tracking può essere completamente automatizzato, con il sistema che individua e segue autonomamente i punti di riferimento sul soggetto.
 - o **Tracking manuale**: In questo caso, tramite software semi-automatici, i punti di repere anatomici vengono selezionati manualmente nei video acquisiti. Questo approccio è più preciso quando i movimenti sono complessi o i marcatori non sono facilmente distinguibili dal sistema.
- Triangolazione: permette la ricostruzione tridimensionale dei punti tracciati, utilizzando i dati raccolti dalle diverse telecamere

3.2.4 Sorgenti di errore

L'accuratezza dei risultati ottenuti nell'analisi del movimento può essere compromessa da diverse fonti di errore:

- Errori Strumentali: Le traiettorie dei punti ricostruiti tramite stereofotogrammetria sono soggette a errori intrinseci del sistema e del protocollo sperimentale. Questi errori si distinguono in (Della Croce U., 2000):
 - o **Errori sistematici**: Derivano da imprecisioni nella calibrazione fotogrammetrica e da limitazioni nel correggere le non linearità, come la distorsione dell'obiettivo. La loro entità varia in base alla posizione del marcatore all'interno del campo di misura.
 - o **Errori casuali**: Comprendono errori nella ricostruzione delle posizioni dei marcatori durante la calibrazione e nella propagazione di questi errori alla stima della posizione e dell'orientamento dei segmenti corporei e delle coordinate del laboratorio. Gli errori casuali possono derivare da rumore elettronico,

imprecisioni nel ridurre le immagini del marcatore, errori nei punti immagine, e nel processo di digitalizzazione. In generale, questi errori, osservati nel tempo, hanno un valore medio vicino a zero. Gli errori strumentali vengono valutati tramite esperimenti di "spot check", basati sulla misurazione delle distanze note tra marker, effettuati prima di ogni sessione sperimentale.

- Errori nella Collocazione dei Punti di Riferimento Anatomici: derivano principalmente dalla difficoltà di identificare accuratamente punti di riferimento anatomici, specialmente in aree prive di prominenze ossee. Per minimizzare gli errori è essenziale che sia sempre lo stesso operatore a posizionare i marker.
- Artefatto da Tessuto Molle: la deformazione e il movimento della pelle causano lo spostamento dei marker rispetto all'osso sottostante. Questo fenomeno rappresenta la principale fonte di errore nella stima della cinematica. Sebbene siano state proposte varie soluzioni per mitigarlo, una stima affidabile di questo errore non è stata ancora raggiunta, limitando l'efficacia dell'analisi del movimento umano in ambito clinico e biomeccanico. Per ridurre l'impatto degli artefatti da tessuto molle, si suggerisce di:
 - o Valutare il pattern dell'errore specifico del soggetto su esercizi mirati o caratterizzarlo tramite una serie di misurazioni su ampie popolazioni.
 - o Utilizzare vincoli articolari, che riducono lo spostamento rigido di un gruppo di marcatori rispetto al segmento osseo su cui sono posizionati, migliorando così la precisione della misurazione (Leardini A., 2005).

3.3 Sensori di Pressione

Le pedane di pressione sono strumenti fondamentali per l'analisi biomeccanica del movimento, progettate per misurare in modo dettagliato le forze esercitate dai piedi sul suolo durante attività come la camminata, la corsa, i salti e altre azioni dinamiche. Si basano su una matrice di sensori distribuiti sulla superficie della pedana, che rilevano le variazioni di pressione in tempo reale e forniscono dati quantitativi sulla distribuzione del carico e sull'interazione tra il corpo e il terreno. Questi dispositivi sono particolarmente utili in ambito sportivo, clinico e riabilitativo per la valutazione di posture, schemi di movimento, squilibri biomeccanici e carichi anomali che possono portare a lesioni o dolori cronici.

Caratteristiche tecniche e funzionamento

Le pedane di pressione utilizzano una matrice di sensori capacitivi, resistivi o piezoelettrici per rilevare le forze di reazione al suolo. Quando un atleta o un paziente esercita una pressione sulla pedana, i sensori registrano la forza esercitata in ogni punto e producono una mappa dettagliata della pressione plantare. Le principali caratteristiche includono:

- **Risoluzione spaziale:** la densità dei sensori determina il livello di dettaglio con cui viene registrata la distribuzione della pressione sulla superficie della pedana.
- **Frequenza di campionamento:** una frequenza elevata consente di catturare con precisione movimenti rapidi, come la corsa o i salti.
- **Superficie della pedana:** la dimensione varia a seconda dell'applicazione, con pedane più grandi utilizzate per analisi dinamiche complesse e quelle più piccole per valutazioni statiche o localizzate.
- **Interfaccia digitale:** i dati acquisiti vengono trasferiti a un software per l'elaborazione e l'analisi, fornendo informazioni su parametri come forza totale, distribuzione della pressione e traiettoria del Centro di Pressione (COP).

Parametri analizzati

Le pedane di pressione consentono di raccogliere numerosi dati, tra cui:

- **Distribuzione della pressione plantare:** permette di identificare aree di sovraccarico o sottocarico, spesso associate a squilibri posturali o alterazioni biomeccaniche
- **Forze di reazione al suolo (GRF):** rappresentano le forze generate dal contatto tra il piede e il suolo, essenziali per analizzare le dinamiche del movimento.
- **Traiettoria del Centro di Pressione (COP):** fornisce informazioni sulla stabilità e sul controllo posturale durante movimenti statici e dinamici.
- **Tempo di contatto e di spinta:** analizza le fasi del movimento, come l'appoggio, la spinta e il rilascio, utili per studiare la tecnica nella corsa o nella camminata.

Applicazioni delle pedane di pressione

Le pedane di pressione trovano applicazione in diversi ambiti:

- **Sportivo:** consentono di ottimizzare la tecnica sportiva, identificare squilibri o asimmetrie durante l'allenamento e ridurre il rischio di infortuni. Ad esempio, possono rilevare anomalie nei movimenti durante i cambi di direzione o l'esecuzione di salti.

- **Riabilitativo:** sono utilizzate per monitorare il recupero post-infortunio, valutare l'efficacia di interventi terapeutici e sviluppare piani di riabilitazione personalizzati. Permettono di verificare la corretta distribuzione del peso e l'equilibrio tra i due arti inferiori.
- **Clinico:** utilizzate per diagnosticare patologie come il piede piatto, il piede cavo, o alterazioni della deambulazione, come nel caso di soggetti con malattie neurologiche o ortopediche.
- **Ricerca biomeccanica:** forniscono dati precisi per lo studio delle dinamiche del movimento umano, migliorando la comprensione dei meccanismi sottostanti alle lesioni e alle prestazioni fisiche.

Limiti e prospettive

Nonostante la loro elevata utilità, le pedane presentano alcune limitazioni, tra cui:

- **Dimensioni limitate:** lo spazio di acquisizione può non essere sufficiente per analisi di movimenti più complessi, come quelli che richiedono lunghe distanze o spazi più ampi.
- **Costo elevato:** rappresentano un investimento significativo, limitandone l'accessibilità per alcune strutture.
- **Influenza delle calzature:** l'analisi può essere influenzata dal tipo di scarpa indossata, richiedendo una standardizzazione per una corretta comparazione dei dati.

Grazie ai continui progressi tecnologici, le pedane di pressione stanno diventando sempre più versatili e precise. L'integrazione con sensori inerziali e sistemi di analisi video consente una valutazione multidimensionale del movimento, ampliando le possibilità di utilizzo in campo sportivo, clinico e riabilitativo.

In laboratorio vengono usate principalmente le pedane di pressione, mentre fuori, dove non è possibile installare le pedane, vengono utilizzate delle apposite solette: più facilmente utilizzabili rispetto alle pedane, per la loro versatilità nel trasporto e nello svolgimento di task più sport specifici.

3.4 Protocolli

Nella motion capture, i protocolli sono fondamentali per standardizzare la raccolta, l'analisi e l'interpretazione dei dati sul movimento, garantendo coerenza e affidabilità; variano in base all'obiettivo dell'analisi (come biomeccanica, sport, cinema) e alla tecnologia utilizzata. L'uso di tali protocolli implica definire un *markerset*.

Un **markerset** è un insieme specifico di marcatori, posizionati strategicamente su punti anatomici (o un oggetto) per acquisire dati sul movimento. Ogni markerset è progettato per soddisfare particolari esigenze di analisi, in quanto la disposizione e il numero di marcatori variano in base al tipo di movimento da analizzare e agli obiettivi dello studio (come camminata, postura, movimenti atletici o espressioni facciali).

Nella scelta di un protocollo per la motion capture, è essenziale considerare le seguenti caratteristiche:

- Riduzione del tempo di preparazione e raccolta dati: Ottimizzare il tempo richiesto per posizionare i marker e raccogliere i dati dei pazienti è fondamentale per la praticità del protocollo.
- Tridimensionalità: Utilizzare almeno tre marker non allineati per ogni segmento anatomico, in modo da garantire la ricostruzione tridimensionale del movimento.
- Visibilità dei marker: I marker devono essere visibili da almeno due telecamere per una cattura accurata.
- Alta accuratezza: Il protocollo deve assicurare misurazioni precise, riducendo al minimo gli errori di acquisizione.
- Affidabilità nella definizione dei piani anatomici: È importante che il protocollo consenta una definizione coerente dei piani anatomici per garantire un'interpretazione fisiologica e clinica oggettiva.
- Semplicità di applicazione dei marker: Il posizionamento dei marker deve essere rapido e facile, con punti di repere anatomici identificabili tramite palpazione.
- Minima variabilità: Il protocollo dovrebbe garantire consistenza nelle misurazioni, riducendo la variabilità tra sessioni o operatori.
- Riduzione degli ingombri: Il sistema di marker e telecamere deve essere il meno ingombrante possibile per non interferire con il movimento naturale del paziente.

I principali protocolli utilizzati sono:

- **Protocollo Plug-in Gait**: uno dei protocolli più utilizzati in ambito clinico e biomeccanico. È specificamente progettato per l'analisi del cammino, la valutazione della postura, la riabilitazione e lo studio di patologie come la paralisi cerebrale o i disturbi del cammino. Usa un numero predeterminato di marker posizionati su punti anatomici standardizzati, come il bacino, le ginocchia, le caviglie e i piedi, per ricostruire i movimenti delle articolazioni principali.
- **Protocollo Helen Hayes**: Utilizzato in clinica per valutazioni funzionali di pazienti con problemi di deambulazione e per creare protocolli riabilitativi personalizzati. Prevede un set di marker molto simile al Plug-in Gait, con una particolare enfasi sul movimento degli arti inferiori.
- **Protocollo CAST (Calibrated Anatomical Systems Technique)**: Usato nella ricerca biomeccanica per studi avanzati sul movimento e in applicazioni sportive dove è richiesta alta precisione, utilizza marker per tracciare l'anatomia in modo dettagliato e specifico. Richiede una calibrazione iniziale per stabilire il sistema anatomico e utilizza un posizionamento dei marker personalizzato per ogni soggetto. Questo permette una rappresentazione più precisa della struttura ossea e muscolare.
- **Protocollo Davis (Davis et Al., 1991)**: ampiamente usato per l'analisi del cammino in ambito clinico e biomeccanico grazie alla sua standardizzazione e affidabilità. Prevede un markerset posizionato su punti chiave degli arti inferiori (bacino, anche, ginocchia, caviglie e piedi) per tracciare le articolazioni principali e consentire una ricostruzione precisa del movimento. È particolarmente utile per l'analisi delle disfunzioni motorie, la pianificazione riabilitativa e il monitoraggio dei pazienti. La sua facile replicabilità e consistenza ne fanno uno standard di riferimento per cliniche e laboratori biomeccanici.
- **Protocollo IOR-Gait**: che analizzeremo più nel dettaglio.

3.4.1 Protocollo IOR-GAIT

Il Protocollo IOR-gait è stato sviluppato nel 2007 presso l'Istituto Ortopedico Rizzoli di Bologna da Leardini, Sawacha e colleghi (Leardini, Sawacha et al. 2007). Questo protocollo rappresenta un punto d'incontro tra l'affidabilità del protocollo Davis e la precisione del protocollo CAST, riducendo sia il numero di calibrazioni necessarie che il tempo di

preparazione del paziente. È quindi ideale per pazienti con limitazioni motorie e pediatriche, dove lo spazio anatomico è ridotto, garantendo un'accurata definizione dei piani anatomici e migliorando l'efficacia delle analisi biomeccaniche.

Caratteristiche:

- Minore complessità di calibrazione: richiede solo 6 calibrazioni, semplificando la preparazione e facilitando l'uso su pazienti con difficoltà a mantenere una posizione statica.
- Sistemi di riferimento anatomici: Definiti secondo le linee guida CAST, con calibrazione di punti chiave come epicondilo mediale e malleolo mediale, e stima geometrica della testa del femore.
- Precisione e affidabilità: Garantisce alta accuratezza nella rilevazione delle fasi del cammino e della distribuzione delle pressioni plantari, fornendo dati utili per un'analisi dettagliata della biomeccanica del cammino.
- Applicazioni: Utilizzato per monitorare e migliorare la performance atletica, la prevenzione degli infortuni e per ottimizzare i movimenti durante la corsa o il cammino.
- Markerset: Comprende 22 marker cutanei su punti anatomici rilevanti per tracciare accuratamente la cinematica degli arti inferiori e del bacino, posizionati su:
 - Spine iliache anteriori e posteriori (ASIS, PSIS)
 - Grande trocantere (GT)
 - epicondilo laterale (LE)
 - Testa del perone (HF)
 - Tuberosità tibiale (TT)
 - Malleolo laterale (LM)
 - Tendine d'Achille (CA)
 - Prima e quinta testa metatarsale (FM, VM).

La testa del femore (FH) viene ricostruita attraverso una predizione geometrica basata sulla posizione dei quattro punti di reperi del bacino

Il calcolo degli angoli articolari si basa su Grood & Suntay (Grood ES, Suntay WJ, 1983).

3.5 Analisi On Field

L'**analisi on field** rappresenta una metodologia avanzata e innovativa per lo studio del movimento direttamente sul campo di gioco, offrendo una combinazione unica di precisione tecnologica e realismo contestuale. A differenza delle analisi in laboratorio, che avvengono in ambienti controllati e standardizzati, l'approccio on field consente di valutare i movimenti degli atleti nel contesto specifico della loro attività sportiva. Questo metodo tiene conto di variabili ambientali, superfici di gioco, interazioni con compagni e avversari, e intensità massimali tipiche delle prestazioni agonistiche.

Nel calcio, ad esempio, l'analisi on field è ampiamente utilizzata per studiare cambi di direzione, salti e atterraggi, fornendo dati preziosi per la prevenzione di lesioni, come quelle al legamento crociato anteriore (LCA). Inoltre, è uno strumento essenziale per monitorare il recupero post-infortunio, permettendo di adattare progressivamente il carico di lavoro in base alle capacità dell'atleta.

In sintesi, l'analisi on field offre nuove opportunità per lo studio del movimento, la prevenzione degli infortuni e l'ottimizzazione della performance atletica. Sebbene presenti alcune sfide tecniche, i continui sviluppi tecnologici ne stanno ampliando le potenzialità, rendendola sempre più accessibile e affidabile per atleti e ricercatori.

3.5.1 Tecnologie utilizzate

L'analisi sul campo si basa su una combinazione di strumenti portatili, discreti e altamente tecnologici, capaci di registrare dati dettagliati senza compromettere la naturalezza dei movimenti. Tra i dispositivi più utilizzati troviamo:

- Sensori inerziali (IMU): accelerometri, giroscopi e magnetometri che misurano accelerazioni, rotazioni e orientamenti nello spazio, ideali per rilevare cambi di direzione, salti e atterraggi. Questi dispositivi sono indossabili e leggeri, facilmente integrabili nell'abbigliamento o nelle scarpe dell'atleta.
- Solette pressorie: dotate di sensori resistivi o capacitivi, forniscono informazioni sulla distribuzione della pressione plantare, sul Centro di Pressione (COP) e sulle forze di reazione al suolo in tempo reale. Sono particolarmente utili per valutare l'efficienza dei movimenti durante corsa, cambi di direzione e altre azioni specifiche.
- Sistemi di analisi video senza marcatori (*markerless*): utilizzano telecamere ad alta velocità e algoritmi di visione artificiale per tracciare i movimenti corporei senza la

necessità di posizionare marcatori fisici. Questo metodo è versatile e meno invasivo, permettendo di registrare sequenze di gioco in modo naturale.

- GPS e sistemi di posizionamento globale: forniscono informazioni sulle variabili spaziali e temporali come distanza percorsa, velocità, accelerazione, decelerazione e cambi di direzione, fondamentali per monitorare il carico di lavoro durante allenamenti e competizioni.
- Pedane di forza portatili: utilizzate per analizzare i parametri cinetici, come la forza di reazione al suolo durante i salti o gli sprint. Sebbene più difficili da integrare sul campo rispetto ad altri strumenti, offrono dati di grande precisione.
- Elettromiografi di superficie wireless: registrano l'attività muscolare durante movimenti complessi, fornendo informazioni utili sul reclutamento muscolare e sull'efficienza neuromuscolare.

3.5.2 Vantaggi dell'analisi on field

L'analisi *on field* offre molti benefici che la rendono utile per la ricerca e la pratica sportiva:

1. Contestualizzazione reale: consente di analizzare i movimenti e le azioni specifiche di uno sport direttamente nelle condizioni in cui vengono eseguiti, includendo fattori come superfici irregolari, condizioni meteorologiche, e l'interazione con altri atleti.
2. Valutazione a intensità massimale: a differenza del laboratorio, dove gli atleti possono non esprimere il massimo della loro performance a causa di limitazioni ambientali, sul campo si possono osservare movimenti eseguiti alla massima intensità.
3. Analisi di gesti specifici e complessi: cambi di direzione, salti, tiri e altre azioni sport-specifiche possono essere registrati e analizzati per ottimizzare la tecnica e ridurre il rischio di infortuni.
4. Prevenzione degli infortuni: permette di identificare schemi di movimento scorretti, sovraccarichi funzionali o deficit muscolari, fornendo dati fondamentali per progettare programmi di prevenzione personalizzati.
5. Monitoraggio del carico di lavoro: grazie all'integrazione con sistemi GPS e sensori inerziali, è possibile valutare il carico esterno e interno durante allenamenti e competizioni, riducendo il rischio di sovraccarico e migliorando la pianificazione dei cicli di allenamento.

6. Facilità di utilizzo sul campo: molte delle tecnologie utilizzate sono facilmente trasportabili e semplici da implementare, rendendo possibile l'acquisizione di dati direttamente nelle sessioni di allenamento o durante le partite.

3.5.3 Limitazioni e sfide

Nonostante i numerosi vantaggi, l'analisi *on field* presenta alcune criticità che devono essere affrontate per garantire l'affidabilità dei risultati:

- Interferenze ambientali: condizioni meteorologiche variabili, presenza di ostacoli visivi o illuminazione inadeguata possono influenzare la qualità dei dati acquisiti.
- Sincronizzazione dei dispositivi: la gestione di più strumenti simultaneamente richiede una sincronizzazione accurata per evitare discrepanze temporali tra i dati raccolti.
- Elaborazione dei dati: la quantità di informazioni raccolte può essere enorme, rendendo necessario l'uso di software avanzati e algoritmi di intelligenza artificiale per l'analisi e l'interpretazione dei dati.
- Accuratezza: pur offrendo maggiore praticità, i dispositivi *on field* potrebbero non raggiungere l'accuratezza delle misurazioni ottenibili in un ambiente controllato.

3.6. Variabili Biomeccaniche

L'analisi biomeccanica del movimento, supportata da strumenti avanzati come i sistemi di video motion capture e le solette di pressione, permette di raccogliere dati precisi e dettagliati su numerose variabili biomeccaniche. Queste variabili offrono una comprensione approfondita del comportamento articolare e muscolare durante movimenti complessi, come quelli richiesti nel calcio. Tra le variabili più significative, emergono:

1. **Angoli articolari**: descrivono l'ampiezza del movimento articolare;
2. **Momenti articolari**: indicano le forze rotazionali generate intorno alle articolazioni;
3. **Distribuzioni delle pressioni plantari**: che evidenziano i pattern di carico durante il contatto del piede con il suolo.

Queste misure consentono di individuare fattori di rischio biomeccanici associati alle lesioni del LCA e sono essenziali per progettare strategie preventive mirate. Di seguito, viene approfondita l'analisi degli angoli e dei momenti articolari, con un focus su flessione, estensione, adduzione e abduzione.

3.6.1. Angoli di Flessione ed Estensione

Gli angoli di flessione ed estensione descrivono il grado di movimento articolare durante specifiche fasi del movimento, come il carico, l'atterraggio o il cambio di direzione. Sono misurati a livello di tre articolazioni principali:

- Ginocchio: È fondamentale per valutare la sua capacità di assorbire e distribuire il carico. Un angolo di flessione ridotto, soprattutto durante la fase di atterraggio, è associato a un aumento delle forze anteriori sulla tibia, un fattore di rischio per l'LCA.
- Anca: L'angolo di flessione dell'anca determina l'allineamento complessivo dell'arto inferiore e influisce sulla capacità di stabilizzare il movimento. Un controllo insufficiente a questo livello può aumentare il rischio di collasso dinamico in valgo del ginocchio.
- Caviglia: La flessione dorsale della caviglia è cruciale per una corretta distribuzione del carico e per l'efficacia della spinta. Una flessione dorsale limitata può portare a compensazioni biomeccaniche che sovraccaricano il ginocchio.

L'analisi di queste variabili consente di identificare eventuali restrizioni articolari o deficit funzionali, elementi che possono essere corretti attraverso esercizi specifici di mobilità e forza.

3.6.2. Momenti di Flessione ed Estensione

I momenti articolari di flessione ed estensione rappresentano le forze torcenti generate intorno a un'articolazione, riflettendo il contributo muscolare e il controllo neuromuscolare necessari per stabilizzare il movimento.

- Ginocchio: I momenti di flessione sono strettamente correlati alla forza dei muscoli posteriori della coscia (hamstring), che agiscono come stabilizzatori dinamici dell'LCA, opponendosi alle forze anteriori che spingono la tibia in avanti rispetto al femore. Un controllo insufficiente dei momenti di flessione può portare a un'eccessiva estensione del ginocchio, aumentando il rischio di stress sull'LCA;
- Anca: I momenti di estensione dell'anca sono generati principalmente dai muscoli glutei e dai muscoli posteriori della coscia. Questi momenti contribuiscono alla stabilità del bacino e all'efficienza della trasmissione delle forze verso il ginocchio e la caviglia;

- Caviglia: I momenti di flessione dorsale e plantare influenzano la capacità di assorbire gli impatti e di produrre una spinta efficace durante le fasi di accelerazione o decelerazione.

Il controllo di questi momenti dipende dalla forza muscolare e dall'efficacia della catena cinetica. Un disequilibrio può esporre l'atleta a un maggiore rischio di lesione.

3.6.3. *Momenti di Adduzione e Abduzione*

I momenti di adduzione e abduzione sono fondamentali per comprendere il controllo laterale delle articolazioni, in particolare del ginocchio e dell'anca, durante movimenti che coinvolgono cambi di direzione o arresti improvvisi.

- Ginocchio: Un eccessivo momento di adduzione è associato al collasso in valgo dinamico, condizione che pone un carico significativo sull'LCA. Questo avviene frequentemente durante movimenti asimmetrici, come il pivoting o i cambi di direzione, in cui l'instabilità laterale aumenta il rischio di lesione.
- Anca: I momenti di abduzione riflettono l'attivazione dei muscoli glutei medio e piccolo, che stabilizzano l'arto inferiore durante i movimenti laterali. Una ridotta forza o attivazione di questi muscoli può portare a compensazioni che aumentano il carico sul ginocchio.

Un'analisi dettagliata di questi momenti permette di identificare debolezze muscolari specifiche e di progettare interventi mirati per migliorare la stabilità articolare.

L'analisi delle variabili biomeccaniche, tra cui gli angoli articolari e i momenti di flessione, estensione, adduzione e abduzione, offre una comprensione completa delle dinamiche del movimento. I dati raccolti da sistemi di motion capture o analisi video e solette di pressione permettono di identificare i deficit funzionali che aumentano il rischio di lesioni al legamento crociato anteriore.

Questi risultati rappresentano la base per la progettazione di interventi specifici, come programmi di allenamento mirati al miglioramento della forza, della mobilità e del controllo neuromuscolare, contribuendo alla prevenzione degli infortuni e all'ottimizzazione delle prestazioni sportive.

Capitolo 4

Proposta di studio: Materiali E Metodi

In questo capitolo si descrivono i materiali e i metodi proposti per uno studio futuro. La sperimentazione prevede l'utilizzo di tecnologie avanzate di analisi del movimento, test funzionali e la progettazione di un protocollo di allenamento mirato.

4.1 Popolazione dello studio

La popolazione coinvolta nello studio dovrà essere composta da:

- Partecipanti: almeno 30 atleti maschi di età compresa tra 18 e 30 anni, attivi in squadre di calcio dilettantistiche e semiprofessionistiche, senza pregressi infortuni al LCA.
- Criteri di inclusione:
 - Praticare calcio da almeno 5 anni.
 - Assenza di lesioni muscolo-scheletriche negli ultimi 6 mesi.
 - Consenso informato firmato per la partecipazione allo studio.
- Criteri di esclusione:
 - Precedenti interventi chirurgici agli arti inferiori.
 - Condizioni mediche o ortopediche che precludano la pratica sportiva.

4.2 Strumentazione e tecnologie

La raccolta dei dati sarà effettuata tramite i seguenti strumenti:

- Sistema di video analisi;
- Solette di pressione plantare;
- Elettromiografia di superficie (EMG);
- Dinamometro.



Solette di pressione



Dinamometro

4.3 Protocolli di valutazione

4.3.1. Analisi biomeccanica dei cambi di direzione

I partecipanti saranno sottoposti a un test standardizzato di cambio di direzione (90°):

- Procedura: Gli atleti eseguiranno uno sprint di 10 metri, seguito da un cambio di direzione a 90° verso sinistra o destra, completando altri 5 metri di corsa. Il test sarà ripetuto tre volte per ciascun lato.
- Misurazioni:
 - o Angoli di flesso-estensione, intra-extra rotazione di anca, ginocchio e caviglia.
 - o Momenti torcenti e carichi articolari rilevati dalle pedane di forza.
 - o Attivazione muscolare dei muscoli del quadricipite, ischiocrurali e gastrocnemio mediante EMG.

4.3.2 Test funzionali

I partecipanti saranno valutati attraverso:

- Test di Bosco: per valutare la forza esplosiva
- Back squat 1RM: per valutare la forza massima dei quadricipiti
- Test di Squeeze degli Adduttori con Dinamometro: per valutare la forza massima
- Single-leg squat test: per osservare eventuali deficit di controllo motorio.
- Y-Balance Test: per misurare la stabilità dinamica e la simmetria tra gli arti inferiori.
- Isocinetica: valutazione della forza dei muscoli flessori ed estensori del ginocchio in velocità angolari di 60°/s e 180°/s.

4.4 Intervento e follow-up

Dopo la fase di valutazione, sarà progettato un programma di allenamento personalizzato per ciascun atleta basato sui risultati individuali.

- Durata: 12 settimane.
- Componenti principali del programma:
 - o Esercizi di potenziamento muscolare (enfasi su quadricipiti, ischiocrurali e glutei).
 - o Allenamento neuromuscolare per migliorare il controllo motorio.

- Esercizi specifici per i cambi di direzione, con variazioni di velocità e angolazione.
- Lavoro sulla flessibilità e mobilità articolare.

Un follow-up sarà condotto al termine delle 12 settimane per ripetere i test funzionali e biomeccanici, valutando eventuali miglioramenti nei parametri critici legati al rischio di infortunio.

4.5 Analisi statistica

L'analisi statistica sarà condotta per interpretare i dati raccolti durante le fasi di valutazione pre e post-intervento. L'obiettivo principale è identificare eventuali cambiamenti significativi nei parametri biomeccanici e funzionali dopo il programma di allenamento, nonché verificare la correlazione tra le variabili analizzate e i fattori di rischio di lesione al LCA.

I dati saranno processati utilizzando software statistici avanzati che permettono un'elaborazione approfondita e l'applicazione di diversi modelli statistici.

– Definizione delle variabili

- *Variabili indipendenti:*

- Condizione pre-intervento e post-intervento.
- Lato dominante e non dominante per i test funzionali.

- *Variabili dipendenti:*

- Angoli articolari durante i cambi di direzione (anca, ginocchio e caviglia).
- Momenti di forza rilevati dalle pedane di forza.
- Attivazione muscolare misurata tramite EMG (tempi di attivazione, ampiezza dei segnali).
- Risultati dei test funzionali (es. punteggi dello Y-Balance Test e misure di forza isocinetica).

– Test statistici

– Livello di significatività

4.6 Validità e limiti dello studio

L'efficacia dello studio dipenderà dalla validità interna ed esterna delle procedure adottate, nonché dalla capacità di affrontare i potenziali limiti metodologici.

- Validità interna
 - o **Utilizzo di strumenti standardizzati:** L'impiego di tecnologie validate scientificamente, come i sistemi di motion capture e le pedane di forza, assicura un'elevata precisione nella misurazione dei parametri biomeccanici.
 - o **Procedure controllate:** Tutti i test saranno condotti in un laboratorio biomeccanico per minimizzare le variabili ambientali che potrebbero influenzare i risultati.
 - o **Affidabilità intra- ed inter-valutatore:** Gli operatori saranno opportunamente addestrati e il posizionamento dei marker sarà verificato con protocolli standardizzati per ridurre errori umani.
- Validità esterna: La validità esterna, ovvero la generalizzabilità dei risultati alla popolazione dei calciatori, potrebbe essere influenzata da:
 - o **Selezione del campione:** Lo studio si concentra su atleti dilettanti e semiprofessionisti; pertanto, i risultati potrebbero non essere applicabili a calciatori professionisti o a soggetti con differenti livelli di allenamento.
 - o **Specificità delle condizioni:** Le misurazioni di laboratorio potrebbero non riflettere pienamente le dinamiche di gioco reali, dove fattori ambientali come terreno e situazioni impreviste giocano un ruolo cruciale.
- Limiti metodologici:
 - o **Dimensione del campione:** Con un campione di 30 atleti, lo studio potrebbe avere una potenza statistica limitata per identificare differenze sottili o relazioni complesse tra variabili.
 - o **Durata dell'intervento:** Il programma di 12 settimane, sebbene sufficiente per osservare alcuni cambiamenti, potrebbe non essere adeguato per indurre adattamenti neuromuscolari completi e duraturi.
 - o **Possibile effetto placebo:** Gli atleti potrebbero migliorare anche solo per effetto dell'attenzione ricevuta, indipendentemente dall'efficacia del protocollo di allenamento.

4.6.1. Strategie per mitigare i limiti

- Espansione futura del campione: Coinvolgendo un numero maggiore di atleti e includendo diverse categorie sportive, si potrebbe migliorare la generalizzabilità dei risultati.
- Confronto con contesti reali: Integrazione di test sul campo per validare i risultati di laboratorio in condizioni simili al gioco reale.
- Monitoraggio a lungo termine: Follow-up a distanza di 6-12 mesi per verificare la persistenza degli adattamenti ottenuti e il loro effetto sulla prevenzione delle lesioni.

Questi accorgimenti consentiranno di bilanciare i limiti dello studio e di ottenere risultati utili per lo sviluppo di strategie preventive e protocolli di allenamento specifici, contribuendo alla riduzione del rischio di lesioni del LCA nel calcio.

Capitolo 5

L'Allenamento nella Prevenzione delle Lesioni LCA

L'allenamento integrato della forza massima, della forza esplosiva, della risposta neuromuscolare e della biomeccanica riveste un ruolo cruciale nella riduzione del rischio di lesione. Questi elementi, infatti, contribuiscono al miglioramento della stabilità articolare, del controllo motorio e della capacità di gestire le forze applicate agli arti inferiori durante movimenti complessi come i cambi di direzione e i salti.

5.1 Forza massima e stabilità articolare

L'allenamento della forza massima si riferisce alla capacità di generare la massima tensione muscolare durante una contrazione volontaria. Studi recenti dimostrano che una muscolatura più forte, in particolare a livello del quadricipite e degli ischiocrurali, è associata a una maggiore stabilità del ginocchio, riducendo il rischio di stress sul LCA (Palmieri-Smith et al., 2008).

Gli ischiocrurali, in particolare, agiscono come stabilizzatori dinamici, opponendosi al movimento di traslazione anteriore della tibia causato dalla contrazione del quadricipite, un movimento che mette a rischio l'integrità del LCA (Zebis et al., 2011). Lavorare sulla forza massima di questi muscoli aiuta a bilanciare le forze tra la parte anteriore e posteriore del ginocchio, migliorando la capacità di resistere a carichi elevati durante movimenti complessi, inoltre:

- **Riduce lo stress articolare:** Muscoli più forti assorbono meglio le forze esterne, alleggerendo il carico sul LCA e sulle altre strutture del ginocchio.
- **Migliora la stabilità dinamica:** Un buon equilibrio tra forza di quadricipiti e ischiocrurali contribuisce a mantenere il ginocchio in una posizione biomeccanicamente favorevole.
- **Contrasta i movimenti anomali:** La forza muscolare aiuta a prevenire il collasso in valgo del ginocchio, una delle principali cause di lesione del LCA.

Esercizi Chiave per Incrementare la Forza Massima

Per ottenere una forza massima ottimale, è necessario un programma che includa esercizi multiarticolari e specifici per i muscoli stabilizzatori del ginocchio:

1. Squat con Bilanciere:

- **Obiettivo:** Sviluppare forza nei quadricipiti, glutei e ischiocrurali.
- **Esecuzione:** Scendere fino a raggiungere un angolo di 90° al ginocchio, mantenendo una colonna vertebrale neutra.
- **Varianti:** Front squat (enfattizza i quadricipiti), box squat (aumenta il controllo della profondità).

2. Stacco da Terra:

- **Obiettivo:** Rinforzare la catena posteriore (ischiocrurali, glutei e muscoli paravertebrali).
- **Esecuzione:** Sollevare il bilanciere da terra con un movimento coordinato di anca e ginocchio.
- **Varianti:** Romanian deadlift (maggior enfasi sugli ischiocrurali).

3. Affondi Frontali e Lateral:

- **Obiettivo:** Sviluppare forza unilaterale e stabilità del ginocchio.
- **Esecuzione:** Mantenere il busto eretto durante l'affondo e controllare il movimento in fase eccentrica.

4. Nordic Hamstring Curl:

- **Obiettivo:** Allenare la forza eccentrica degli ischiocrurali.
- **Esecuzione:** Mantenere il corpo rigido mentre ci si abbassa lentamente, sfruttando il controllo muscolare.

5. Leg Press:

- **Obiettivo:** Rafforzare il quadricipite senza sovraccaricare la schiena.
- **Esecuzione:** Spingere la piattaforma mantenendo il controllo della fase eccentrica.

Stabilità Articolare: Complemento alla Forza Massima

Sebbene la forza massima sia cruciale, la stabilità articolare richiede un allenamento specifico che coinvolga esercizi di equilibrio e controllo neuromuscolare:

1. **Plank Laterali:** Migliorano la stabilità del core, essenziale per il controllo globale del movimento.
2. **Single-leg Romanian Deadlift:** Rafforza i muscoli stabilizzatori e migliora il controllo dinamico dell'arto.

5.2 Forza esplosiva e controllo dinamico

La forza esplosiva, ovvero la capacità di sviluppare rapidamente alti livelli di forza, è fondamentale nei movimenti ad alta intensità come i cambi di direzione e i salti. Deficit di forza esplosiva sono stati correlati a un rischio maggiore di lesioni al LCA, poiché riducono la capacità degli arti inferiori di assorbire e redistribuire efficacemente le forze (Hewett et al., 2005).

Programmi di allenamento pliometrico, che includono esercizi come salti e atterraggi controllati, hanno dimostrato di migliorare la forza esplosiva e il controllo neuromuscolare. Questo tipo di allenamento riduce il rischio di cadute improvvise in valgo dinamico, un meccanismo di lesione comune nel calcio (Myer et al., 2006).

La forza esplosiva non si limita al miglioramento della performance; svolge un ruolo fondamentale nella riduzione del rischio di lesioni grazie alla sua capacità di:

- **Ridurre il tempo di contatto al suolo:** Minore è il tempo di contatto, minori sono le forze destabilizzanti accumulate.
- **Aumentare l'efficienza neuromuscolare:** Favorisce un'attivazione muscolare rapida e coordinata, riducendo il rischio di movimenti biomeccanicamente svantaggiosi.
- **Preparare il corpo a forze ad alta intensità:** Allenare la forza esplosiva abitua le strutture muscolari e articolari a gestire carichi dinamici elevati.

Gli esercizi di forza esplosiva devono essere scelti in base alla specificità del gesto atletico e alla fase del ciclo di allenamento. Tra i più utilizzati:

1. **Countermovement Jump (CMJ):**
 - **Obiettivo:** Sviluppare la potenza muscolare degli arti inferiori.
 - **Esecuzione:** Partire in stazione eretta, scendere rapidamente in squat e saltare verticalmente cercando di raggiungere l'altezza massima.

- **Focus:** Valutare la simmetria tra gli arti durante l'atterraggio per ridurre il rischio di valgo dinamico.
2. **Depth Jump:**
- **Obiettivo:** Migliorare la capacità di assorbire e generare forze.
 - **Esecuzione:** Saltare da un box alto, atterrare e subito dopo eseguire un salto verticale.
 - **Focus:** Controllo dell'atterraggio per minimizzare il collasso articolare.
3. **Sprint Brevi con Resistenza:**
- **Obiettivo:** Sviluppare accelerazione e forza esplosiva.
 - **Esecuzione:** Sprint di 10-20 metri con paracadute, sled o elastici.
 - **Focus:** Mantenere la postura corretta e una tecnica di corsa efficiente.
4. **Salti Pliometrici Laterali:**
- **Obiettivo:** Migliorare la reattività laterale, cruciale nei cambi di direzione.
 - **Esecuzione:** Eseguire salti esplosivi lateralmente, atterrando in equilibrio su un piede.
 - **Focus:** Controllo della stabilità del ginocchio e assorbimento dell'impatto.
5. **Kettlebell Swing:**
- **Obiettivo:** Sviluppare potenza negli ischiocrurali e glutei.
 - **Esecuzione:** Utilizzare un movimento esplosivo dell'anca per sollevare il kettlebell fino all'altezza del petto.
 - **Focus:** Coordinazione tra bacino, anca e arti inferiori.

Controllo Dinamico: Prevenire i Movimenti Pericolosi

Il controllo dinamico è la capacità di mantenere la stabilità articolare durante movimenti rapidi e multidirezionali. È fondamentale nei gesti specifici del calcio, come cambi di direzione, frenate improvvise e atterraggi.

Un controllo dinamico efficace riduce:

- **Il rischio di valgo dinamico:** Spesso responsabile della rottura del LCA durante cambi di direzione o atterraggi.
- **La probabilità di squilibri muscolari:** Favorisce un'attivazione muscolare equilibrata tra i gruppi agonisti e antagonisti.

- **Le perturbazioni articolari:** Assicura che il ginocchio rimanga in una posizione biomeccanicamente sicura anche durante movimenti complessi.

Esercizi per il Controllo Dinamico

1. Drill di Cambi di Direzione (90° Cutting Maneuver):

- **Obiettivo:** Migliorare la capacità di eseguire cambi di direzione rapidi e sicuri.
- **Esecuzione:** Corsa lineare seguita da un cambio di direzione laterale di 90° in risposta a uno stimolo visivo o sonoro.
- **Focus:** Stabilità del ginocchio durante la spinta e l'assorbimento dell'impatto.

2. Atterraggi Controllati da Salti:

- **Obiettivo:** Migliorare la stabilità durante l'assorbimento dell'impatto.
- **Esecuzione:** Saltare da un'altezza predeterminata e atterrare con entrambi i piedi mantenendo il ginocchio allineato.
- **Focus:** Evitare il collasso mediale e mantenere l'equilibrio.

3. Single-Leg Hops con Feedback Visivo:

- **Obiettivo:** Migliorare la capacità di atterraggio su un piede e la stabilità dinamica.
- **Esecuzione:** Eseguire salti su un piede, atterrando su target specifici.
- **Focus:** Stabilizzazione dell'arto inferiore e risposta neuromuscolare rapida.

5.3 Risposta neuromuscolare e prevenzione delle lesioni

La risposta neuromuscolare è la capacità del sistema nervoso di attivare rapidamente e in modo efficiente i muscoli per rispondere agli stimoli esterni. Un ritardo nella risposta neuromuscolare, ad esempio nel tempo di attivazione degli ischiocrurali, è stato identificato come un fattore di rischio significativo per le lesioni del LCA (Alentorn-Geli et al., 2009).

Esercizi specifici come il training propriocettivo, l'uso di superfici instabili e l'inclusione di perturbazioni durante l'allenamento migliorano la capacità dei muscoli di rispondere rapidamente ai cambiamenti improvvisi di direzione. Questo è cruciale per mantenere la stabilità del ginocchio durante le situazioni di gioco (Griffin et al., 2006).

Un sistema neuromuscolare ben allenato consente:

- **Controllo posturale dinamico:** Capacità di mantenere una postura biomeccanicamente sicura durante movimenti ad alta velocità.
- **Assorbimento delle forze:** Miglior capacità di distribuire uniformemente le forze che agiscono sul ginocchio.
- **Riduzione dei tempi di reazione:** Risposta più rapida a perturbazioni esterne, minimizzando il rischio di movimenti incontrollati.

L'allenamento neuromuscolare si concentra su esercizi che stimolano il sistema nervoso a rispondere rapidamente e con precisione a stimoli variabili. Tra gli approcci più efficaci:

1. **Propriocettività su Superfici Instabili:**

- **Strumenti:** Balance board, Bosu ball, pedane oscillanti.
- **Esecuzione:** Esercizi come squat o equilibrio su una gamba su superfici instabili migliorano la capacità di stabilizzazione dinamica.
- **Benefici:** Rafforzano il controllo articolare e riducono i tempi di reazione.

2. **Perturbazioni Esterne:**

- **Esecuzione:** Esercizi di equilibrio in cui l'atleta subisce spinte leggere o deve rispondere a forze esterne impreviste.
- **Benefici:** Simulano situazioni reali di gioco, migliorando la capacità di gestire gli impatti e i contrasti.

3. **Drill Reattivi Basati su Stimoli Visivi o Sonori:**

- **Esecuzione:** L'atleta esegue cambi di direzione o movimenti rapidi in risposta a segnali visivi (es. luci LED) o sonori.
- **Benefici:** Allena il sistema neuromuscolare a rispondere rapidamente e a mantenere il controllo biomeccanico.

4. **Esercizi di Stabilità Dinamica:**

- **Esecuzione:** Single-leg Romanian deadlift, single-leg hops con feedback visivo, squat su pedana instabile.
- **Benefici:** Migliorano il controllo dinamico del ginocchio e dell'anca durante i movimenti complessi.

5. **Training Cognitivo-Neuromotorio:**

- **Strumenti:** Sistemi come FitLight o BlazePod per stimolare reazioni rapide a segnali casuali.

- **Benefici:** Integra la componente cognitiva, fondamentale in situazioni di gioco dove decisioni rapide e precise sono cruciali.

5.4 Biomeccanica e ottimizzazione del movimento

La biomeccanica gioca un ruolo centrale nella prevenzione delle lesioni al LCA, poiché movimenti scorretti possono aumentare il carico sul ginocchio. Analisi biomeccaniche dettagliate hanno dimostrato che angoli di atterraggio troppo rigidi, un eccessivo valgo dinamico e una rotazione interna del femore sono tra i principali meccanismi di lesione (Krosshaug et al., 2007).

L'allenamento basato sui principi biomeccanici mira a correggere queste alterazioni. Ad esempio, programmi di prevenzione come il FIFA 11+ hanno mostrato risultati positivi nella riduzione del rischio di lesioni, enfatizzando il corretto allineamento del ginocchio e migliorando i pattern di movimento attraverso esercizi mirati (Soligard et al., 2008).

Un'ottimizzazione biomeccanica si traduce in:

- **Riduzione del carico anomalo sul ginocchio:** Movimenti efficienti minimizzano le sollecitazioni non necessarie sull'LCA.
- **Controllo delle posizioni critiche:** Posizioni come il valgo dinamico o l'iperestensione del ginocchio possono essere prevenute con una corretta biomeccanica.
- **Aumento della stabilità dinamica:** Un movimento biomeccanicamente corretto assicura un controllo migliore durante le azioni rapide e multidirezionali.

Un programma di allenamento focalizzato sulla biomeccanica integra esercizi che riproducono i gesti atletici specifici del calcio. Alcuni esempi includono:

1. Drill di Atterraggio Controllato:

- **Esecuzione:** Saltare da un box e atterrare su entrambi i piedi, mantenendo ginocchia e anche allineate.
- **Focus:** Prevenire il valgo dinamico e garantire un corretto assorbimento delle forze.

2. Cambi di Direzione Assistiti:

- **Esecuzione:** Utilizzo di elastici per facilitare la spinta durante il cambio di direzione.
- **Focus:** Rinforzo del controllo neuromuscolare e riduzione delle deviazioni biomeccaniche.

3. Squat con Feedback Visivo:

- **Esecuzione:** Utilizzo di specchi o sistemi di video-feedback per garantire un corretto allineamento articolare durante l'esercizio.
- **Focus:** Correzione delle asimmetrie e miglioramento della tecnica.

4. Stretching Dinamico Focalizzato:

- **Obiettivo:** Incrementare la mobilità di anca, ginocchio e caviglia per favorire un movimento fluido.
- **Esercizi:** Hip flexor stretch, ankle dorsiflexion stretch.

5. Isolamento Muscolare e Rinforzo Funzionale:

- **Obiettivo:** Migliorare la forza e il controllo dei muscoli stabilizzatori.
- **Esercizi:** Clamshell, side plank con abduzione, glute bridge su una gamba.

5.5 Approccio integrato: dalla teoria alla pratica

L'allenamento combinato di forza, esplosività, neuromuscolarità e biomeccanica ha dimostrato di essere il metodo più efficace per prevenire le lesioni al LCA. Revisioni e studi longitudinali hanno dimostrato che i programmi di prevenzione multifattoriali riducono l'incidenza delle lesioni al LCA del 50-70% (Hewett et al., 2005; Myklebust et al., 2003; Sugimoto et al., 2016)

Questo metodo coinvolge forza, stabilità, neuromuscolatura, biomeccanica e mobilità, tutti considerati elementi essenziali per ridurre il rischio di lesioni. Come suggerito da Hewett et al. (2010), la prevenzione delle lesioni LCA richiede una visione olistica che consideri l'interazione tra fattori fisici, tecnici e ambientali.

Inoltre, l'educazione degli atleti e del team tecnico sulla corretta esecuzione dei movimenti migliora l'aderenza ai protocolli di allenamento e massimizza l'efficacia del programma (Mandelbaum et al., 2005).

Principi dell'Approccio Integrato

L'implementazione di un approccio integrato si articola su tre principi fondamentali:

1. Valutazione Personalizzata:

- Secondo Myer et al. (2013), la prevenzione delle lesioni LCA deve iniziare con uno screening completo per identificare i fattori di rischio individuali, come asimmetrie muscolari, deficit neuromuscolari o schemi di movimento alterati. Test come il Y-Balance Test, il Drop Vertical Jump Test e l'analisi biomeccanica sono strumenti chiave per ottenere un quadro dettagliato.
- L'uso di tecnologie come il motion capture e le pedane di forza consente di valutare con precisione i movimenti e di identificare le aree che necessitano di miglioramento (Dai et al., 2014).

2. Allenamento Multifattoriale:

- Un programma di prevenzione deve integrare esercizi di forza, stabilità dinamica, controllo neuromuscolare e ottimizzazione biomeccanica. Ad esempio, l'allenamento eccentrico degli ischiocrurali, come i Nordic Hamstring Curl, è stato dimostrato efficace per ridurre l'incidenza delle lesioni LCA (Petersen et al., 2011).
- L'allenamento pliometrico combinato con il controllo dinamico può migliorare significativamente la capacità dell'atleta di gestire i carichi durante i cambi di direzione e gli atterraggi (Hewett et al., 2005).

3. Feedback Continuo e Adattamento:

- Come suggerito da Grooms et al. (2017), l'integrazione di feedback visivi e sonori durante gli esercizi può migliorare il controllo motorio e aumentare l'efficacia del training. Per esempio, i drill reattivi con segnali visivi (FitLight o BlazePod) simulano le condizioni di gioco, allenando la capacità decisionale e la stabilità neuromuscolare.

Esempio di Applicazione Pratica

Un programma integrato può essere strutturato come segue:

1. Valutazione Iniziale:

- Screening della forza muscolare, mobilità articolare e stabilità dinamica utilizzando test specifici (es. test isocinetici, analisi del movimento).

2. Pianificazione dell'Allenamento:

- **Forza:** Esercizi come squat, affondi e deadlift per sviluppare forza massima e stabilità.
- **Neuromuscolatura:** Balance board e perturbazioni esterne per migliorare la risposta neuromuscolare.
- **Biomeccanica:** Drill specifici per i cambi di direzione e gli atterraggi, con feedback visivo per correggere eventuali errori.

3. Monitoraggio e Feedback:

- Misurazione regolare dei progressi attraverso test biomeccanici e funzionali.
- Adattamento del programma basato sui miglioramenti osservati e sull'evoluzione delle esigenze individuali.

5.6 Proposte di Allenamento

Basandomi sulla letteratura scientifica e sull'esperienza maturata negli anni come preparatore atletico per una prima squadra, propongo le seguenti linee guida per l'allenamento:

1. Riscaldamento Specifico

Considerato fondamentale per preparare il corpo all'allenamento e alla competizione (Aerts et al. 2015) per innalzare la temperatura corporea e attivare la muscolatura (Bishop, 2003a, 2003b), è stato anche dimostrato del protocollo FIFA 11+ che è in grado di ridurre le lesioni LCA del 30-50% (Soligard et al., 2008). Un riscaldamento ideale dovrebbe includere:

- **Stretching Dinamico:** Mobilità dell'anca e della caviglia per migliorare la flessibilità (es. affondi dinamici, hip flexor stretch).
- **Esercizi di Attivazione:** Come il Monster Walk con elastico per attivare i glutei e stabilizzare l'anca.

- **Drill di Stabilità Dinamica:** Esercizi su una gamba, come il Single-leg Balance, per preparare i muscoli alla stabilità.

2. Pliometria e Potenza Esplosiva

L'allenamento pliometrico migliora la capacità di generare forza rapidamente e il controllo durante movimenti esplosivi. La ricerca di Hewett et al. (2005) ha dimostrato che la pliometria, quando combinata con il feedback biomeccanico, riduce il rischio di lesioni LCA.

Esercizi Pliometrici:

- **Box Jump con Atterraggio Controllato:** Valutare l'allineamento del ginocchio per prevenire il valgo dinamico.
- **Depth Jump:** Migliora la capacità di assorbire le forze durante l'atterraggio.
- **Salti Lateral:** Rinforzano il controllo nei movimenti laterali.

3. Controllo Neuromuscolare e Propriocettività

Gli esercizi propriocettivi e di controllo neuromuscolare migliorano la stabilità articolare e la risposta rapida a perturbazioni esterne. Grooms et al. (2017) hanno dimostrato che drill basati su feedback sensoriali (visivi e uditivi) migliorano l'efficacia di questi allenamenti.

Esercizi Consigliati:

- **Single-leg Balance su Pedane Instabili:** Migliora la stabilità dinamica del ginocchio.
- **Drill con Perturbazioni Esterne:** Simula le condizioni di gioco, migliorando il controllo posturale.
- **Y-Balance Test come Esercizio:** Valutazione e allenamento dell'equilibrio dinamico.

4. Esercizi Biomeccanici Correttivi

L'analisi biomeccanica consente di identificare schemi di movimento errati e di correggerli con esercizi mirati (Dai et al., 2014).

- **Focus:**
 - Correggere il valgo dinamico durante l'atterraggio.
 - Migliorare la mobilità di anca e caviglia per prevenire schemi di movimento compensatori.

- **Esempi di Esercizi:**

- **Atterraggi Correttivi da Box:** Feedback visivo per garantire un allineamento ottimale.
- **Cambi di Direzione Assistiti:** Lavoro specifico per ridurre gli angoli di torsione sul ginocchio.

5. Allenamento della Forza

L'allenamento della forza è essenziale per ridurre il carico sul LCA e migliorare la stabilità articolare. Studi come quelli di Myer et al. (2005) suggeriscono che esercizi di forza massima ed eccentrica siano particolarmente efficaci nella prevenzione delle lesioni.

- **Esercizi Consigliati:**

- **Squat Profondi:** Per rinforzare quadricipiti, glutei e muscoli posteriori della coscia.
- **Nordic Hamstring Curl:** Riduce il rischio di lesioni aumentando la forza eccentrica degli ischiocrurali (Petersen et al., 2011).
- **Affondi Laterali:** Migliorano la forza unilaterale e il controllo dell'anca.

6. Defaticamento e Recupero

Il defaticamento contribuisce a migliorare la mobilità, ridurre le tensioni muscolari e favorire il recupero. Il rilassamento miofasciale (foam rolling) sono indicati per mantenere l'elasticità muscolare e prevenire rigidità articolari (Peake et al., 2017).

Progressioni e Monitoraggio

Secondo Myklebust et al. (2003), l'aderenza ai programmi preventivi è essenziale per ottenere risultati significativi. La progressione deve includere:

1. **Incremento Graduale dei Carichi:** Per evitare sovraccarichi.
2. **Test Periodici:** Come il Drop Vertical Jump Test per monitorare miglioramenti biomeccanici.
3. **Adattamento Continuo:** Basato sulle esigenze individuali e sui risultati delle valutazioni.

Conclusione

Come abbiamo detto le lesioni al LCA rappresentano una delle problematiche più significative nel calcio e in molti altri sport, con conseguenze rilevanti sia dal punto di vista sportivo che personale per gli atleti. Questo lavoro ha evidenziato come la comprensione dei meccanismi di lesione, dei fattori di rischio e delle strategie preventive sia fondamentale per ridurre l'incidenza di tali infortuni e migliorare la longevità sportiva.

Attraverso l'analisi biomeccanica, è possibile identificare movimenti scorretti e pattern di rischio specifici, come il valgo dinamico e l'iperestensione del ginocchio. L'integrazione di tecnologie avanzate, come il motion capture, consente di sviluppare un approccio scientifico per la valutazione e il miglioramento del movimento. Parallelamente, l'allenamento mirato della forza massima, della forza esplosiva e della risposta neuromuscolare rappresenta un pilastro fondamentale per garantire stabilità articolare, controllo motorio e adattamenti biomeccanici positivi.

Programmi di allenamento multifattoriali, che includano esercizi di forza, pliometria, training propriocettivo e correzioni biomeccaniche, si sono dimostrati efficaci nella prevenzione delle lesioni al LCA. Questi interventi non solo riducono il rischio di infortuni, ma migliorano anche le prestazioni sportive complessive, creando atleti più resistenti e consapevoli del proprio corpo.

In conclusione, la prevenzione delle lesioni al LCA richiede un approccio integrato e basato sull'evidenza scientifica. Gli sforzi combinati di allenatori, preparatori atletici, fisioterapisti e ricercatori sono essenziali per sviluppare protocolli sempre più specifici e individualizzati. Il futuro della prevenzione passa attraverso una maggiore diffusione di programmi educativi, l'uso della tecnologia per l'analisi del movimento e l'implementazione di strategie innovative che possano tutelare la salute degli atleti, garantendo loro una carriera sportiva lunga e di successo.

Bibliografia

1. Guiotto A, Ciniglio A, Spolaor F, Pavan D, Cibin F, Scaldaferrò A, Sawacha Z. Reliability and Repeatability of ACL Quick Check[®]: A Methodology for on Field Lower Limb Joint Kinematics and Kinetics Assessment in Sport Applications. *Sensors (Basel)*. 2021 Dec 30;22(1):259. Doi: 10.3390/s22010259. PMID: 35009800; PMCID: PMC8749888.
2. Asgari M, Alizadeh MH, Shahrbanian S, Nolte K, Jaitner T. Effects of the FIFA 11+ and a modified warm-up programme on injury prevention and performance improvement among youth male football players. *PLoS One*. 2022 Oct 20;17(10):e0275545. doi: 10.1371/journal.pone.0275545. PMID: 36264894; PMCID: PMC9584367.
3. Brukner P. & Khan K.: “*Anterior cruciate ligament injuries*”. In Brukner P. & Khan K. “*Clinical Sports Medicine*”, Mc Graw Hill Education, 2012; pag. 639 – 663.
4. Zbrojkiewicz D., Vertullo C., Grayson J. E.: “*Increasing rates of anterior cruciate ligament reconstruction in young Australians, 2000-2015*” *Med. J. Aust.*, 2018; 208(8):354-358.
5. Waldén M, Hägglund M, Magnusson H, Ekstrand J. ACL injuries in men's professional football: a 15-year prospective study on time trends and return-to-play rates reveals only 65% of players still play at the top level 3 years after ACL rupture. *Br J Sports Med*. 2016 Jun;50(12):744-50. doi: 10.1136/bjsports-2015-095952. Epub 2016 Mar 31. PMID: 27034129.
6. Alentorn-Geli, E., et al. (2009). "Prevention of non-contact anterior cruciate ligament injuries in soccer players. Part 1: Mechanisms of injury and underlying risk factors." *The American Journal of Sports Medicine*.
7. Griffin, L. Y., et al. (2006). "Understanding and preventing noncontact anterior cruciate ligament injuries." *The American Journal of Sports Medicine*.
8. Hewett, T. E., et al. (2005). "Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes." *The American Journal of Sports Medicine*.
9. Krosshaug, T., et al. (2007). "Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in sports: a systematic video analysis." *The American Journal of Sports Medicine*.

10. Myer, G. D., et al. (2006). "Neuromuscular training improves performance and lower-extremity biomechanics in female athletes." *Journal of Strength and Conditioning Research*.
11. Palmieri-Smith, R. M., et al. (2008). "Hamstrings are more important than quadriceps in maintaining anterior cruciate ligament loading and stability." *Journal of Biomechanics*.
12. Soligard, T., et al. (2008). "Comprehensive warm-up programme to prevent injuries in young female footballers: cluster randomised controlled trial." *BMJ*.
13. Sugimoto, D., et al. (2016). "The effectiveness of neuromuscular training to reduce ACL injuries in female athletes: a systematic review." *The American Journal of Sports Medicine*.
14. Zebis, M. K., et al. (2011). "Neuromuscular pre-activation during side-cutting with and without the risk of ACL injury." *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*.
15. Camilleri D, Calcio: Scienza e Pratica, Brescia (MI), Project Invictus, 2022;
16. Ferretti F. & Co, Il nuovo Calcio: allenamento fisico nel calcio - Concetti e principi metodologici, Milano, Sportivi Edizioni, 2023;
17. Roi G. S., I Test di valutazione funzionale nel calcio, Milano, Edizioni Correre, 2024;
18. Sannicandro I., Il Nuovo Calcio: Allenamento Fisico e prevenzione nel calcio giovanile – Proposte pratiche dai piccoli amici alla primavera, Milano, Sportivi Edizioni, 2022;
19. Boyi Dai, Dewei Mao, William E. Garrett, Bing Yu - Review 2014. Anterior cruciate ligament injuries in soccer: Loading mechanisms, risk factors, and prevention programs
20. Carling C, Le Gall F, McCall A, Nédélec M, Dupont G. Squad management, injury and match performance in a professional soccer team over a championship-winning season. *Eur J Sport Sci*. 2015;15(7):573-82. doi: 10.1080/17461391.2014.955885. Epub 2014 Sep 12. PMID: 25216043;
21. Crompton, J., Galea, M. P., & Phillips, B. (2007). Hand-held dynamometry for muscle strength measurement in children with cerebral palsy. *Developmental medicine and child neurology*, 49(2), 106–111;
22. Ebben, W. P., Vanderzanden, T., Wurm, B. J., & Petushek, E. J. (2010). Evaluating plyometric exercises using time to stabilization. *Journal of strength and conditioning research*, 24(2), 300–306;

23. Eirale C, Tol JL, Farooq A, Smiley F, Chalabi H. Low injury rate strongly correlates with team success in Qatari professional football. *Br J Sports Med.* 2013 Aug;47(12):807-8. doi: 10.1136/bjsports-2012-091040. Epub 2012 Aug 17. PMID: 22904292; PMCID: PMC3717779;
24. García-Luna, M. A., Cortell-Tormo, J. M., García-Jaén, M., Ortega-Navarro, M., & Tortosa-Martínez, J. (2020). Acute Effects of ACL Injury-Prevention Warm-Up and Soccer-Specific Fatigue Protocol on Dynamic Knee Valgus in Youth Male Soccer Players. *International journal of environmental research and public health*, 17(15), 5608;
25. Graham-Smith P, Jones PA, Comfort P, Munro AG. (2013). Reliability of a new method for assessing knee extensor and flexor muscle balance: The angle of crossover. *International Journal of Athletic Therapy and Training.* 18: 1–5;
26. Gribble, P. A., Mitterholzer, J., & Myers, A. N. (2012). Normalizing considerations for time to stabilization assessment. *Journal of science and medicine in sport*, 15(2), 159–163;
27. Häggglund M, Waldén M, Magnusson H, Kristenson K, Bengtsson H, Ekstrand J. Injuries affect team performance negatively in professional football: an 11-year follow-up of the UEFA Champions League injury study. *Br J Sports Med.* 2013 Aug;47(12):738-42. doi: 10.1136/bjsports-2013-092215. Epub 2013 May 3. PMID: 23645832;
28. Hewett, Timothy & Johnson, Darren. (2010). ACL Prevention Programs: Fact or Fiction?. *Orthopedics.* 33. 36-9. 10.3928/01477447-20091124-19;
29. Lindblom, H., Waldén, M., Carlford, S., & Häggglund, M. (2020). Limited positive effects on jump-landing technique in girls but not in boys after 8 weeks of injury prevention exercise training in youth football. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA*, 28(2), 528–537;
30. Mawson R, Creech MJ, Peterson DC, Farrokhyar F, Ayeni OR. Lower limb injury prevention programs in youth soccer: a survey of coach knowledge, usage, and barriers. *J Exp Orthop.* 2018 Oct 11;5(1):43. doi: 10.1186/s40634-018-0160-6. PMID: 30306281; PMCID: PMC6179968;
31. Zarei, M., Abbasi, H., Namazi, P., Asgari, M., Rommers, N., & Rössler, R. (2020). The 11+ Kids warm-up programme to prevent injuries in young Iranian male high-level football (soccer) players: A cluster-randomised controlled trial. *Journal of science and medicine in sport*, 23(5), 469–474;

32. Barber-Westin, S. D., Hermeto, A. A., & Noyes, F. R. (2010). A six-week neuromuscular training program for competitive junior tennis players. *Journal of strength and conditioning research*, 24(9), 2372–2382. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e-3181e8a47f>.
33. Bizzini, M., Impellizzeri, F. M., Dvorak, J., Bortolan, L., Schena, F., Modena, R., & Junge, A. (2013). Physiological and performance responses to the “FIFA 11+” (part 1): is it an appropriate warm-up? *Journal of sports sciences*, 31(13), 1481–1490. <https://doi.org/10.1080/02640414.2013.802922>.
34. Bizzini M, Dvorak J. (2015). FIFA 11+: an effective programme to prevent football injuries in various player groups worldwide. A narrative review. *British Journal of Sports Medicine*, 49:577-579.
35. Bonato, M., Benis, R., & La Torre, A. (2018). Neuromuscular training reduces lower limb injuries in elite female basketball players. A cluster randomized controlled trial. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 28(4), 1451–1460. <https://doi.org/10.1111/sms.13034>.
36. Davis, A. C., Emptage, N. P., Pounds, D., Woo, D., Sallis, R., Romero, M. G., & Sharp, A. L. (2021). The Effectiveness of Neuromuscular Warmups for Lower Extremity Injury Prevention in Basketball: A Systematic Review. *Sports medicine - open*, 7(1), 67. <https://doi.org/10.1186/s40798-021-00355-1>.
37. FIFA11+ FOR KIDS MANUAL, a warm-up programme for preventing injuries in children’s football. http://assets.ngin.com/attachments/document/0112/8344/11__kids_manual.pdf
38. Foss, K., Thomas, S., Khoury, J. C., Myer, G. D., & Hewett, T. E. (2018). A School-Based Neuromuscular Training Program and Sport-Related Injury Incidence: A Prospective Randomized Controlled Clinical Trial. *Journal of athletic training*, 53(1), 20–28. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-173-16>.
39. Hilska, M., Leppänen, M., Vasankari, T., Aaltonen, S., Raitanen, J., Räisänen, A. M., Steffen, K., Forsman, H., Konttinen, N., Kujala, U. M., & Pasanen, K. (2021). Adherence to an Injury Prevention Warm-Up Program in Children’s Soccer-A Secondary Analysis of a Randomized Controlled Trial. *International journal of environmental research and public health*, 18(24), 13134. <https://doi.org/10.3390/ijerph182413134>.

40. Impellizzeri, F. M., Bizzini, M., Dvorak, J., Pellegrini, B., Schena, F., & Junge, A. (2013). Physiological and performance responses to the FIFA 11+ (part 2): a randomised controlled trial on the training effects. *Journal of sports sciences*, 31(13), 1491–1502. <https://doi.org/10.1080/02640414.2013.802926>.
41. Lindblom, H., Carlford, S., & Hägglund, M. (2018). Adoption and use of an injury prevention exercise program in female football: A qualitative study among coaches. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 28(3), 1295–1303. <https://doi.org/10.1111/sms.13012>.
42. Lindblom, H., Waldén, M., & Hägglund, M. (2020). Performance Effects with Injury Prevention Exercise Programmes in Male Youth Football Players: A Randomised Trial Comparing Two Interventions. *Sports medicine - open*, 6(1), 56. <https://doi.org/10.1186/s40798-020-00282-7>.
43. Mandelbaum B.R., Silvers H.J., Watanabe D., Knarr J., Thomas S., Griffin L., Kirken-2 dall D.T., Garret Jr. W. (2003). Effectiveness of a Neuromuscular and Proprioceptive Training Program in Preventing the Incidence of Acl Injuries in Female Athletes: Two- Ye- ar Follow Up. Santa Monica Orthopaedic and Sports Medicine Research Foundation.
44. Noyes, F. R., Barber-Westin, S. D., Smith, S. T., & Campbell, T. (2011). A training program to improve neuromuscular indices in female high school volleyball players. *Journal of strength and conditioning research*, 25(8), 2151–2160. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181f906ef>.
45. Owoeye, O., Palacios-Derflingher, L. M., & Emery, C. A. (2018). Prevention of Ankle Sprain Injuries in Youth Soccer and Basketball: Effectiveness of a Neuromuscular Training Program and Examining Risk Factors. *Clinical journal of sport medicine: official journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*, 28(4), 325–331. <https://doi.org/10.1097/JSM.0000000000000462>.
46. Owoeye, O., Emery, C. A., Befus, K., Palacios-Derflingher, L., & Pasanen, K. (2020). How much, how often, how well? Adherence to a neuromuscular training warm-up injury prevention program in youth basketball. *Journal of sports sciences*, 38(20), 2329–2337. <https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1782578>.
47. Owoeye O., Pasanen K., Raisanen A., Befus K., Tait T.J., Stilling C., Warriyar V., Derflingher L.P., Emery C. (2021a). Supervised implementation of a neuromuscular

- training warm-up programme to improve adherence and reduce injuries in youth basketball: a cluster randomised trial. *British Journal of Sports Medicine*, 55: A22-A23.
48. Owoeye O., Pasanen K., Befus K., Stilling C., Ghali B., Tait T.J., HubkaRao T., Derflinger L.P., Warriyar V., Emery C. (2021b). The effectiveness of neuromuscular training warm-up programme to reduce knee and ankle injuries in youth basketball: a historical cohort study. *British Journal of Sports Medicine*, 55:A23.
49. Petushek, E. J., Sugimoto, D., Stoolmiller, M., Smith, G., & Myer, G. D. (2019). Evidence-Based Best-Practice Guidelines for Preventing Anterior Cruciate Ligament Injuries in Young Female Athletes: A Systematic Review and Meta-analysis. *The American journal of sports medicine*, 47(7), 1744–1753. <https://doi.org/10.1177/0363546518782460>.
50. Pomares-Noguera, C., Ayala, F., Robles-Palazón, F. J., Alomoto-Burneo, J. F., López-Valenciano, A., Elvira, J., Hernández-Sánchez, S., & De Ste Croix, M. (2018). Training Effects of the FIFA 11+ Kids on Physical Performance in Youth Football Players: A Randomized Control Trial. *Frontiers in pediatrics*, 6, 40. <https://doi.org/10.3389/fped.2018.00040>.
51. Rössler, R., Donath, L., Bizzini, M., & Faude, O. (2016). A new injury prevention programme for children's football--FIFA 11+ Kids--can improve motor performance: a cluster-randomised controlled trial. *Journal of sports sciences*, 34(6), 549–556. <https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1099715>.
52. Sugimoto, D., Mattacola, C. G., Bush, H. M., Thomas, S. M., Foss, K. D., Myer, G. D., & Hewett, T. E. (2017). Preventive Neuromuscular Training for Young Female Athletes: Comparison of Coach and Athlete Compliance Rates. *Journal of athletic training*, 52(1), 58–64. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-51.12.20>.