



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI GENOVA



Università degli Studi di Genova

Scuola di Scienze Mediche e Farmaceutiche

Dipartimento di Neuroscienze, Riabilitazione, Oftalmologia, Genetica e Scienze Materno-Infantili

Master in Riabilitazione dei Disordini Muscoloscheletrici

A.A. 2019/2020

Campus Universitario di Savona

La membrana interossea di gamba: anatomia, fisiologia e aspetti clinico-riabilitativi in seguito a danni di questa struttura.

Candidato:

Dott.ssa Lorena Cillo

Relatore:

Dott. OMT Mattia Bonfatti

Sommario

1. Abstract.....	3
2. Introduzione.....	4
3. Materiali e Metodi.....	5
4. Risultati.....	6
<i>4.1 Anatomia</i>	15
<i>4.2 Fisiologia</i>	17
5. Discussione.....	22
6. Conclusioni.....	24
7. BIBLIOGRAFIA.....	25

1. Abstract

Background: la membrana interossea di gamba è una lamina fibrosa che si estende tra le creste del periostio di tibia e perone, separando i muscoli del compartimento anteriore da quelli del compartimento posteriore. È costituita da due strati di fibre di collagene orientati diversamente che forniscono un supporto rigido per le due ossa, stabilizzando l'articolazione stessa. Questa struttura può danneggiarsi. Negli atleti, per esempio, può verificarsi un'ossificazione della membrana, la quale rimanendo spesso misconosciuta viene trattata inadeguatamente. Un evento più frequente è la lesione correlata alle distorsioni sindesmiche, la quale si mostra di difficile diagnosi, presentando inoltre un periodo di recupero abbastanza lungo. Tuttavia ad oggi c'è ancora una conoscenza incompleta della funzione di questa struttura.

Obiettivo: lo scopo dello studio consiste nel condurre una revisione sistematica della letteratura analizzando gli studi scientifici fino ad oggi pubblicati che indagano l'anatomia e la biomeccanica relativa alla membrana interossea crurale per valutare gli aspetti clinico-riabilitativi che ne conseguono in caso di danno.

Materiali e Metodi: è stata condotta una ricerca bibliografica utilizzando la banca dati Pubmed. La revisione è stata eseguita tra Ottobre 2020 e Febbraio 2021. La stringa di ricerca è stata costruita attraverso diversi sinonimi di membrana interossea correlati tra loro dall'operatore booleano "OR". Sono stati selezionati gli studi in lingua inglese contenenti l'aspetto anatomico e/o fisiologico.

Risultati: la membrana s'identifica in un tessuto ad elevata resistenza, con fibre di collagene altamente allineate tra loro, capace di collegare e stabilizzare tibia e perone. Inoltre, grazie all'orientamento delle fibre, funge da condotto per la trasmissione del carico e degli stress tra queste due ossa e di tutto il complesso inferiore di gamba. La sua stretta relazione con tibia e perone permette di andare a stabilizzare anche le articolazioni adiacenti, quali talocrurale e tibiofibulare prossimale, sia in condizioni di carico statico che dinamico, simulando quello che si verificherebbe durante una normale andatura. Alcuni limiti riportati in letteratura, quali appunto l'assenza di conoscenza del comportamento della membrana in vivo, ancora oggi determinano una conoscenza della membrana incompleta e riportano talvolta aspetti controversi sulla sua funzionalità. La stretta connessione con i muscoli della gamba è abbastanza riportata in letteratura, mentre è di recente scoperta il suo possibile ruolo propriocettivo, grazie al rilevamento di meccanocettori presenti sulla sua superficie.

Conclusioni: dalla letteratura si evince che, in caso di danno alla membrana, si può incorrere in condizioni di instabilità non soltanto tibioperoneale ma anche delle articolazioni adiacenti e pertanto dell'arto inferiore, oltre a comportare dolore dovuto anche dalla presenza di elementi nervosi. Sarà fondamentale quindi diagnosticare il suo coinvolgimento, volto a guidare il trattamento. Questo dovrebbe essere impostato sulla desensibilizzazione attraverso l'educazione, terapia manuale e incremento della capacità di carico, mediante l'esercizio terapeutico. La progressione dovrà tenere in considerazione la richiesta di aiuto del paziente per poter ristabilire la qualità di vita soddisfacente per lo stesso. Ulteriori studi potrebbero chiarire aspetti della membrana volti a migliorarne la comprensione per rilevare un danno, ma soprattutto per chiarire in maniera più definita un protocollo di trattamento nei casi in cui essa sia danneggiata.

2. Introduzione

La membrana interossea crurale è una lamina fibrosa situata all'interno della gamba. Questa si estende tra le creste interossee di tibia e perone, separando i muscoli del compartimento anteriore da quelli del compartimento posteriore.¹ È costituita da due strati di fibre orientate diversamente che decorrono in direzione prossimo-distale, partendo dall'estremità prossimale della tibia verso quella distale del perone.² Nonostante venga chiamata "membrana" è costituita da un tessuto connettivo abbastanza rappresentativo nella sua organizzazione.³

La sua principale funzione è di tipo meccanico. Questa consiste nel fornire un supporto resistente alle due ossa e di andare a stabilizzare l'articolazione stessa. Le altre funzioni che figurano sono: resistere ai movimenti di rotazione del piede e del ginocchio, dando stabilità all'articolazione della caviglia, e di agire come un condotto per la trasmissione dei carichi e degli stress al perone.⁴ È stata dimostrata la sua importanza anche nel fornire stabilità in presenza di fratture tibiali e peroneali. Infatti la membrana non lesionata, sarebbe un fattore determinante nell'evitare lo spostamento dei frammenti ossei immediatamente dopo la lesione o alla successiva deambulazione.⁵

Tuttavia è poco citata in letteratura, dimostrando come non abbia ricevuto molta attenzione da parte di anatomisti e chirurghi, sia in termini di anatomia che di fisiologia, nonostante alcuni studi precedenti avessero fatto emergere la sua importante funzionalità.^{3,6}

Infatti, a differenza della membrana interossea brachiale, per la quale è possibile reperire molteplici studi, la membrana interossea crurale è stata poco analizzata e all'interno degli studi spesso le sue funzioni, e talvolta anche l'aspetto anatomico, appaiono controversi.

Ad oggi però è noto che la membrana può andare incontro a delle compromissioni, per esempio può lesionarsi nella zona distale durante le lussazioni o lesioni tibioperoneali prossimali oppure nelle lesioni tibioperoneali distali, note anche come lesioni alte di caviglia.⁷ Inoltre, a seguito di quest'ultime, la membrana può andare incontro a calcificazioni,⁸ o ancora a calcificazioni eterotopiche, come negli sportivi.⁹ Secondo Lauge-Hansen le lesioni della sindesmosi possono presentarsi in quattro fasi, in cui la membrana interossea viene a essere interessata successivamente alla lesione del legamento deltoideo o alla frattura del malleolo tibiale.¹⁰ In questo tipo di infortunio, la lesione della membrana si verifica quando il perone viene portato eccessivamente verso l'esterno, superando la capacità di resistenza della membrana stessa.¹¹ Le lesioni della sindesmosi complicano circa il 5% delle distorsioni di caviglia, e questo rappresenta un dato non trascurabile se si considera che quasi il 75% degli atleti subisce questo tipo di infortunio durante la sua carriera.¹² Inoltre c'è da dire che queste lesioni possono portare ad esiti peggiori e a lunghe sequele.¹³

Pertanto, lo scopo di questa revisione è stato quello di condurre una ricerca sistematica della letteratura, esaminando gli studi fino ad oggi pubblicati relativi all'aspetto anatomico e fisiologico della membrana, per comprenderne al meglio le peculiarità e proporre eventuali proposte riabilitative nel momento in cui essa dovesse andare incontro ad un danno.

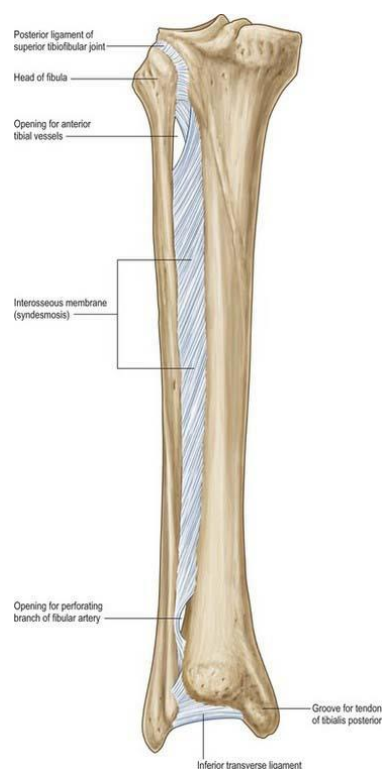


Figura 1. Membrana interossea crurale.

3. Materiali e Metodi

La membrana interossea è una lamina fibrosa che si estende tra tibia e perone. Nonostante in passato siano emerse delle sue qualità, rimane una struttura poco conosciuta. Lo scopo è stato quello di condurre una revisione sistematica della letteratura, riassumendo le caratteristiche emerse dagli articoli, relativamente all'anatomia e fisiologia della stessa per valutare l'eventuale percorso riabilitativo in caso di lesione.

È stata condotta una ricerca bibliografica utilizzando la banca dati Pubmed da Ottobre 2020 a Febbraio 2021. La stringa di ricerca è stata sviluppata mediante differenti sinonimi di membrana interossea correlati tra loro dall'operatore booleano "OR". Sono stati selezionati gli studi in lingua inglese, condotti fino all'ultima data di ricerca, contenenti l'aspetto anatomico e/o fisiologico della struttura.

La stringa di ricerca è stata la seguente:

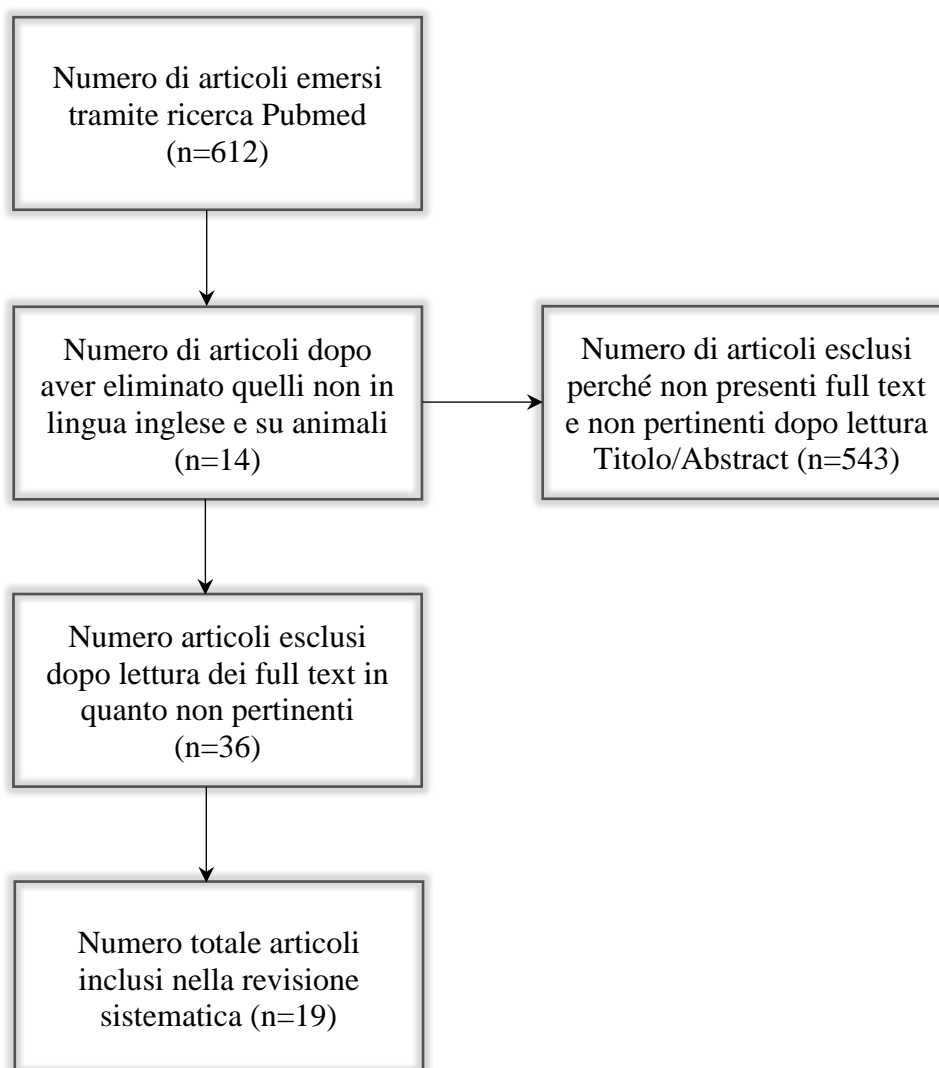
((((((((middle tibiofibular membrane) OR (interosseous syndesmosis membrane)) OR (OIM interosseous membrane leg)) OR (tibiofibular interosseous membrane)) OR (lower limb interosseous membrane)) OR (lower leg interosseous membrane)) OR (lower extremity interosseous membrane)) OR (crural interosseous membrane)) OR (syndesmotic membrane leg)) OR (syndesmosis membrane leg)) OR (tibiofibular syndesmosis membrane)) OR (crural syndesmosis membrane)

Sono stati definiti i seguenti criteri di inclusione: articoli in lingua inglese relativi alla membrana interossea; ed esclusione: articoli non in lingua inglese e studi su animali. Una prima consistente fase di scrematura è stata eseguita attraverso la lettura del titolo e dell'abstract per escludere gli articoli non pertinenti l'argomento in esame, gli articoli non in lingua inglese, studi condotti su animali e articoli in cui non è stato possibile reperire full text. Successivamente è stata eseguita una seconda scrematura tramite la lettura dei full-text. Questo processo ha portato alla selezione del numero finale degli articoli inclusi nello studio. Infine sono stati considerati solo gli articoli attinenti all'argomento di ricerca, soddisfacendo i criteri di inclusione.

4. Risultati

Da questa stringa di ricerca sono emersi 612 articoli. Non sono entrati a far parte della revisione gli studi di lingua non inglese e gli studi condotti su animali, riducendo a 598 gli articoli da sottoporre a screening.

Altri 5 articoli sono stati esclusi per impossibilità di reperire il full text, mentre 538 sono stati eliminati leggendo titolo/abstract in quanto non inerenti all'argomento indagato. Dopo la lettura dei full text sono stati eliminati 36 studi poiché non pertinenti. Al termine dell'analisi di ricerca gli articoli che sono entrati a far parte della revisione sono stati 19.



Riferimento Bibliografico	Obiettivo	Materiali e Metodi	Risultati	Conclusioni
<i>Sarmiento, 1974</i>	Determinare la misura con cui la teoria idraulica e la membrana interossea partecipano alla stabilità nelle fratture di tibia.	Campioni di cadaveri freschi, con e senza tutore funzionale, posti sotto un apparato di compressione, prima e dopo sezionamento della membrana in presenza di frattura tibiale. La membrana è stata poi trazionata per comprendere le caratteristiche meccaniche di resistenza.	Con la resezione della membrana, quando è stato applicato il carico, l'accorciamento ha superato 35 mm rispetto ai 6 mm in presenza della membrana. Inoltre, la membrana può allungarsi parallelamente alle fibre del 120% e trasversalmente 300% prima di rompersi.	La stabilità idraulica è importante nella prevenzione dell'accorciamento nel sito di frattura e nel mantenimento della stabilità, così come la membrana interossea. Questa con la sua elevata resistenza si mantiene intatta e aumenta la stabilità delle fratture tibiali.
<i>Scranton, 1976</i>	Confermare l'ipotesi di funzione dinamica del perone.	Revisione della letteratura sulla funzione fibulare.	Studi roentgenografici e anatomici confermano l'ipotesi di progressiva caduta del perone distale. La membrana tesa, insieme al mortaio più profondo, si verificano in fase di appoggio del piede. Le fratture sono interpretate come disturbi del ruolo dinamico del perone.	La revisione della letteratura rivela un'importante funzione dinamica del perone e della membrana nel mantenere la stabilità della caviglia durante il carico.
<i>Minns e Hunter, 1976</i>	Quantificare le proprietà tensili e l'anatomia della membrana.	Porzioni di 0,5x0,5 cm di membrana, da 3 gambe di cadaveri, sono state analizzate al microscopio elettronico a scansione ed infine trazionate 0,2mm/min con strumento di trazione INSTRON TM112.	La membrana sopporta tra i 164N e 3604N. Trazionata parallelamente alle fibre il tessuto è 45 volte più forte rispetto alla trazione perpendicolare, ma è meno estensibile. Ha una deformazione del 40% alla rottura. L'orientamento delle	La disposizione strutturale delle fibre fornisce un supporto rigido tra le due ossa. Ha una resistenza alla trazione finale elevata che suggerisce di svolgere un ruolo

			<p>fibre è 20°(prossimale) 30°(distale) rispetto all'asse verticale.</p>	<p>importante nel fornire stabilità tibioperoneale.</p>
<p><i>Vukicevic, 1980</i></p>	<p>Definire il ruolo meccanico della membrana crurale nel trasferimento del carico attraverso la parte inferiore di gamba.</p>	<p>Esemplari anatomici imbalsamati di gamba sono stati caricati con sistema a pressa idraulica. La membrana è stata testata con carico assiale, prima e dopo essere stata sezionata per tutta la sua lunghezza, attraverso metodi di interferometria olografica.</p>	<p>Con carichi 20-70 kg, e membrana intatta, la tibia si presentava più deformata in postero-laterale del perone. La membrana, sotto carico, segue in direzione distale la tibia e presenta una zona centro-prossimale di massimo sforzo che limita il rom della PTFJ. La lesione del 20% di questa zona di sforzo crea un'irregolarità di carico sull'astragalo. La lesione totale crea rapporto di deformità tra tibia e perone di 3:1.</p>	<p>La membrana partecipa al trasferimento del carico dal ginocchio al piede, determina la partecipazione attiva del perone nel trasferimento del carico, limitando la libertà di movimento nella PTFJ. Un suo danno può essere significativo per il corretto funzionamento della caviglia.</p>
<p><i>Skraba e Greenwald, 1984</i></p>	<p>Approfondire la funzione che la membrana gioca nella trasmissione dello stress al perone.</p>	<p>3 gambe in vitro, dotati di estensimetri a singolo elemento paralleli alle ossa, sono stati caricati in posizioni da 10° di dorsiflessione fino a 10° di plantiflessione. Il carico assiale, corrispondente ad una normale andatura, è stato applicato da un compressore idraulico.</p>	<p>Dopo l'incisione della membrana la deformazione fibulare si è ridotta a 0. È stata calcolata la media di tre prove di deformazione tibiale e peroneale, prima e dopo resezione della membrana. In tutte le posizioni di carico il calo della deformazione peroneale è stato in percentuale >50%, e in un test >100% .</p>	<p>La membrana funziona da supporto per il perone, trasformando gli stress da forze di compressione articolare in forze di trazione al suo interno. In sua assenza il perone ruota e si sposta lateralmente piuttosto che supportare il carico. Pertanto, la membrana gioca un ruolo attivo nella condivisione</p>

				dei carichi e stabilità tibioperoneale.
<i>Boden, 1989</i>	Verificare la necessità meccanica della vite sindesmótica per aiutare la fissazione rigida di tibia e perone nelle fratture da pronazione-extrarotazione di caviglia.	35 gambe di cadaveri: Gruppo I (13 campioni in cui sono stati sezionati in serie i legamenti e la membrana) Gruppo II (10 campioni in cui il leg.deltoideo è stato sezionato per ultimo). Sono stati poi eseguiti test in extrarotazione-pronazione (440N) e sottoposte per ogni fase a RX.	Nel gruppo I l'allargamento medio della sindesmosi post carico è aumentato gradualmente da 0,5 a 4,5mm, proporzionale all'aumento della rottura della membrana da 1,5 fino a 15 cm prossimale alla caviglia, mentre nel gruppo II è stato 1,4 mm.	Lo studio fornisce prove meccaniche che la fissazione interna della sindesmosi, in queste lesioni, non necessita di integrazione trans-sindesmótica. In assenza del leg.deltoideo la membrana è un importante stabilizzatore della caviglia.
<i>Murali, 1994</i>	Descrivere l'organizzazione delle fibre di collagene della membrana e dimostrare che questa ne determini la sua funzione meccanica, nonché sito ottimale per l'osteotomia fibulare.	Sono state utilizzate 3 gambe post mortem, in cui la membrana è stata esposta perpendicolarmente al fascio dei raggi X. Attraverso software di analisi di immagine, ogni modello di diffrazione è stato analizzato per ottenere una funzione di distribuzione dell'orientamento principale delle fibre e degli altri orientamenti rispetto a questo.	Le fibre risultano molto allineate tra loro, ad angolo acuto e in direzione distale rispetto alla linea mediana che parte dal centro del plateau tibiale. Esse presentano un angolo acuto medio di 13°, in cui a livello prossimale risulta maggiore (16°) e a livello distale minore (12°).	L'orientamento delle fibre indica che, in presenza di carichi dovuti alla muscolatura del piede sul perone, quest'ultimo trazioni verso il basso la membrana, che con le sue fibre si oppone a questa forza, trasferendo il carico alla tibia. Pertanto un'osteotomia fibulare dovrebbe essere prossimale alla rima di frattura per trasmettere questa forza al fine di unire la rima di frattura tibiale.

<p><i>Thomas, 1995</i></p>	<p>Definire la base biomeccanica nel trattamento delle fratture tibiali con osteotomia fibulare, chiarendo il ruolo del perone e della IOM nella condivisione del carico nell'arto inferiore.</p>	<p>9 arti inferiori da cadaveri, dotati di estensimetri uniassiali, sono stati caricati con macchina idraulica (da 0 a 445N), con compressione uniforme a velocità 0,33mm/min in differenti posizioni articolari della caviglia e della sottoastraglica e infine in condizioni intatte, dopo sezione IOM e poi fibulectomia parziale. L'analisi statistica è stata definita significativa con $p < 0,5$.</p>	<p>In posizione neutra e IOM sezionata, la deformazione tibiale laterale è stata -20% in trazione rispetto alla condizione intatta, mentre quella tibiale mediale +6%. La deformità peroneale laterale invece -18%, quella posteriore -66%. Con la membrana intatta il perone risultava piegato antero-lateralmente mentre le deformazioni post sezione della membrana indicano un piegamento postero-laterale.</p>	<p>Il ruolo principale della membrana è quello di ridurre la flessione postero-laterale di tibia e perone. Inoltre il carico nel momento in cui viene sezionata la membrana si riduce, ma non si azzerava.</p>
<p><i>Wang, 1996</i></p>	<p>Definire la relazione tra carico e migrazione del perone, in che modo la membrana e il leg.tibiofibulare inferiore influenzano la stabilità della caviglia e la distribuzione del carico tra tibia e perone.</p>	<p>10 campioni di arto inferiore sono stati strumentati di estensimetri (3 per la tibia - 2 per il perone). Il carico assiale (da 250 a 1500N) è stato dato in posizione di caviglia e sottostraglica neutra, 10° varo e valgo, 15° dorsiflessione. 5 campioni sono stati valutati prima con la sezione dell'IOM e poi del leg.tibiofibulare inferiore. L'output è stato collegato ad un microcomputer.</p>	<p>La proporzione del carico assunto dal perone aumenta con l'incremento del carico totale. Tuttavia, la migrazione distale del perone diminuisce all'aumentare del carico. Nel secondo test, a 1500N, la forza nella zona distale del perone è maggiore (20%) rispetto quella prossimale (14%) mentre tagliando la membrana questa differenza è scomparsa.</p>	<p>Il perone trasporta tra il 10%-30% del carico, che però può variare durante le normali attività. Inoltre, sotto carico c'è una migrazione distale del perone che produce tensione nella membrana. Questa tensione della membrana interossea definisce la condivisione del carico tra il perone e la tibia e determina la stabilità della caviglia.</p>
<p><i>Ebraheim, 1998</i></p>	<p>Descrivere la posizione del</p>	<p>20 gambe imbalsamate sono state fissate in formalina al</p>	<p>L'ATA forma un angolo di 122°</p>	<p>Lo studio riferisce</p>

	forame dell'arteria tibiale anteriore (ATA) nella membrana e la sua proiezione tibiale laterale.	10% e poi sono stati sezionati i muscoli per esporre la membrana. Sono state eseguite varie misurazioni anatomiche e i valori sono stati espressi come media e deviazione standard.	nell'attraversare il forame. Il forame misura 17,1 mm in lunghezza e 8,9mm larghezza. È situato a 57,6mm sotto la testa del perone. L'arteria si sposta infero-lateralmente con distanza 4,2mm dal bordo mediale peroneale.	caratteristiche anatomiche dettagliate del forame interosseo per l'arteria tibiale anteriore e il suo decorso, utili a ridurre il rischio di lesioni iatrogene durante l'osteotomia tibiale alta.
<i>Manyi, 2000</i>	Rilevare l'associazione e l'entità della lesione della membrana interossea nelle fratture di Maisonneuve.	12 pazienti con frattura, prima dell'operazione, sono stati valutati con RMN in sequenza T1, T1STIR, T2. In 3 pazienti è stata valutata anche la gamba sana per confrontare i valori.	In tutti i pazienti risulta una lesione dell'IOM, con una media di 79mm prossimali all'astragalo. La IOM inizia a circa 28mm da esso. In T1 la membrana intatta appare un segnale omogeneo a bassa intensità, in T1STIR la lesione parziale è ondulata ma di bassa intensità, in T2 è un segnale ad alta intensità, ovvero edema.	La membrana è un tessuto di circa 1mm che presenta maggiore tensione e spessore distale, e assente di capillari. Nelle fratture di Maisonneuve la rottura è presente ed è dovuta allo spostamento laterale della fibula che va oltre la resistenza della IOM, mentre prossimale rimane intatta.
<i>Bartonicek, 2003</i>	Descrivere l'anatomia della sindesmosi tibiofibulare.	30 campioni di arti inferiori, imbalsamati e senza patologie pregresse, sono stati sezionati. I legamenti sono stati misurati con un calibro.	L'articolazione è formata da 3 legamenti, oltre che dalla membrana interossea. Il legamento interosseo è un continuum della membrana. Si trova a 4-5 mm dall'astragalo, a forma di piramide in direzione latero-	La struttura anatomica della sindesmosi è complicata. In casi di fratture o impingement antero-laterale di caviglia devono essere considerate tutte le strutture presentate.

			distale contribuisce alla stabilità della caviglia. Fanno parte anche il legamento distale tibiofibulare anteriore e posteriore.	
<i>Driss Elamrani, 2014</i>	Verificare la possibilità di sostituzione della membrana interossea brachiale (AIOM) con la membrana interossea crurale (CIOM), come nuova tipologia di trattamento.	È stato condotto uno studio morfometrico comparativo su 4 arti di 15 cadaveri. La lunghezza è stata misurata con righello, la larghezza con calibro sia in situ che dopo la raccolta, in cui è stato valutato lo spessore delle membrane (CIOM e AIOM). In seguito, i risultati sono stati riportati su tabelle Excel per il calcolo dei valori medi e deviazioni standard.	La lunghezza della CIOM in situ è 24,7 cm. La larghezza al bordo prossimale 1,9 cm, medio 2,3 e distale 1,5cm. Lo spessore medio è 0,54mm. L'orientamento delle fibre dello strato anteriore è in direzione disto-laterale e obliquo in cui formano un angolo di 13° rispetto al perone, lo strato posteriore distale-mediale e più verticale con un angolo di 26°.	La larghezza del CIOM è abbastanza grande da usarlo come sostituto dell'AIOM, specialmente se si raccolgono solo i suoi tre quarti prossimali per preservare la stabilità della caviglia, data dalla porzione distale della membrana.
<i>Asa, 2014</i>	Considerare l'effetto della lunghezza di amputazione sotto il ginocchio (BKA) e dell'integrità della IOM sul movimento fibulare anormale.	Sono stati analizzati 40 campioni di arto inferiore da cadavere sottoposti ad amputazione lunga (10cm) e corta (5cm). Alcuni poi sono stati sottoposti a lesione della IOM. È stato somministrato un carico di trazione al bicipite femorale ed è stato analizzato il movimento fibulare.	L'angolo di abduzione in BKA con IOM sezionata era maggiore a quello con IOM intatta (8,8° contro 6,37°) (P<0,003). Inoltre, il gruppo BKA lungo con IOM sezionata ha prodotto più spostamento rispetto BKA corto con IOM intatta(9,7 mm contro 8,57mm)(P<0,0001).	Lo studio ha mostrato che l'interruzione dell'OIM aumenta l'abduzione fibulare nei BKA indipendentemente dalla lunghezza dell'amputazione e. Questo suggerisce l'importanza della membrana nel mantenere la rigidità tra tibia e perone e nella stabilità della PTFJ.
<i>Wei-Ren Pan, 2017</i>	Rilevare la presenza di	4 campioni di arto inferiore da un uomo e una donna	Sono stati rilevati vasi linfatici e linfonodi. In	Sono stati rilevati i vasi

	vasi linfatici nell'articolazione del ginocchio per implicazioni cliniche.	sono stati valutati attraverso microscopio chirurgico. Sono stati analizzati i vasi linfatici attraverso una soluzione di solfato di bario. Ogni campione poi è stato sezionato e radiografato.	due campioni è stato trovato un piccolo linfonodo in corrispondenza dell'apertura vascolare della membrana, sulla superficie anteriore e uno su quella posteriore.	linfatici perforanti e profondi nella regione del ginocchio migliorando la conoscenza anatomica per una miglior gestione clinica.
<i>Daorong Xu, 2018</i>	Analizzare le differenze di deformazione sub-regionale sui legamenti della sindesmosi (AITFL, PITFL e IOM) durante la rotazione di caviglia.	11 arti inferiori da cadaveri sono stati fissati e sottoposti a carico assiale(430N) e forza progressiva in extrarotazione(35°) e intrarotazione(25°), in posizione neutra, 15° dorsiflessione, 25° plantiflessione. La deformazione è stata registrata da un sistema ottico 3D con correlazione di immagini digitali.	Le deformazioni nell'AITFL sono maggiori nella zona prossimale (P=0.018), mentre per il PITFL e IOM sono uguali all'interno delle sotto-regioni. La regione di deformazione della membrana appare ad angolo obliquo.	Tutti i legamenti compresi la membrana hanno resistito alla torsione nella sindesmosi in rotazione esterna del piede. In particolare è stato dimostrato il ruolo importante della IOM nel resistere ai movimenti rotazionali del piede e stabilizzare il complesso tibiofibulare.
<i>Teresa Alves da Silva, 2018</i>	Descrivere la cinematica dell'articolazione tibiofibulare prossimale (PTFJ) e il contributo dei legamenti e della IOM per la sua stabilità.	In 14 arti inferiori da cadavere sono stati sezionati, in sequenza, il leg.tibiofibulare prossimale anteriore(APTFJ)leg.tibiofibulare prossimale posteriore(PPTFL) e la membrana interossea (IOSM).L'arto è stato mobilizzato senza carico in sequenza di movimenti del ginocchio, caviglia e della PTFJ, e lo spostamento della PTFJ è stato misurato	La sezione del APTFL ha determinato un significativo aumento della mobilità della PTFJ nei movimenti di caviglia e ginocchio(P<0,05;P<0,01). Lo stesso per la sezione del PPTFL(P<0,05;P<0,01). La sezione della IOM ha prodotto un aumento in eversione	La mobilità della PTFJ è determinato dalla mobilità delle articolazioni di ginocchio e caviglia. Tutti i legamenti hanno un'importanza nella stabilità rotazionale di questa

		analizzando la lunghezza di un vettore di distanza tra due sistemi di coordinate 3D, attraverso sensori elettromagnetici posti su tibia e perone.	e inversione del piede($P<0,05$) così come la rotazione interna del ginocchio($P<0,05$), e anche la manipolazione della testa del perone.	articolazione. In particolare la membrana stabilizza l'articolazione nei movimenti rotazionali di piede e ginocchio.
<i>Hakim, 2018</i>	Valutare l'influenza che il prelievo di lembo del perone ha sulla morbilità del sito donatore, a carico dei tendini dell'estensore lungo dell'alluce(EHL) e delle dita(EDL).	In 12 arti inferiori da cadavere è stata eseguita la raccolta del lembo del perone, mentre i tendini del EHL e EDL sono stati sezionati alle falangi prossimali e la tensione dei muscoli valutata con un carico (2,5Kg per l'EHL e 4 Kg per l'EDL). Dopo il distacco della membrana e dell'osteotomia fibulare è stato misurato lo spostamento tendineo con un calibro digitale.	Il distacco della membrana distale, media e prossimale determina uno spostamento significativo dell'EHL($P=0,05$) ma meno dell'EDL($P=0,2$). La divisione della parte distale ha causato il maggior spostamento dell'EHL($P=0,05$).	Il distacco cumulativo della membrana ha determinato uno spostamento dell'EHL e meno dell'EDL, dimostrando la sua stretta relazione come origine di questi muscoli soprattutto a livello prossimale.
<i>Morley, 2019</i>	Descrivere la struttura microscopica e gli elementi nervosi sensoriali nella membrana interossea crurale.	13 membrane da 7 cadaveri sono stati valutate con luce per transilluminazione. Sono state eseguite analisi istologiche con microscopio ottico e per evidenziare la morfologia dei tessuti sono stati colorati con ematossilina ed eosina. I meccanocettori sono stati contattati manualmente e colorati con metodi immunoistochimici e misurati con software di immagini.	L'IOM è a due strati di collagene con angoli di 30° prossimali e 26° distali. Le fibre elastiche si trovano tra i due strati (10,1%) e nel fascicolo di collagene (2,2%). Lo spessore è $268\mu\text{m}$ prossimali, 293 centrali e 365 distali. I meccanocettori si trovano soprattutto sulla superficie. Sono maggiori le terminazioni nervose libere e corpuscoli di Ruffini mentre meno i corpuscoli di Pacini.	L'organizzazione delle fibre suggerisce la trasmissione della forza lungo le fibre e l'estensibilità in direzione trasversale. Distalmente è più spessa per la funzione stabilizzante della caviglia. Infine, la presenza di recettori nervosi implica il probabile ruolo nella propriocezione dell'arto inferiore.

4.1 Anatomia

È fondamentale definire le caratteristiche fisiche e strutturali per poter comprendere a fondo il ruolo che la membrana gioca in associazione all'intero complesso inferiore della gamba. Per conoscere in maniera dettagliata e completa la membrana interossea di gamba, la descrizione anatomica è stata suddivisa in un aspetto macroscopico e uno microscopico.

Organizzazione macroscopica

La membrana interossea crurale è un tessuto fibroso di connessione che collega il periostio di tibia e perone per la maggior parte della loro lunghezza.³ A livello prossimale inizia immediatamente distale ai vasi tibiali anteriori, i quali si trovano a 68 mm distali ai piatti tibiali,¹⁴ mentre distalmente si colloca a circa 28 mm dalla cupola dell'astragalo.¹⁵ A questo livello la membrana si ispessisce portando alla formazione del legamento interosseo, una struttura di forma piramidale, situato 1 cm sopra l'articolazione della caviglia e disposto in direzione disto-laterale e anteriore, che offre un contributo alla stabilità della caviglia stessa.¹⁶ Nella sua porzione prossimale presenta un'apertura che prende il nome di forame ovale. Il forame, situato a 57,6 mm sotto la punta della testa del perone, ha una lunghezza di 17,1 mm circa e larghezza di 8,9 mm. Attraverso quest'apertura, dal compartimento posteriore passa l'arteria tibiale anteriore, ramo dell'arteria poplitea. L'arteria si dirige nel compartimento anteriore, con una direzione caudale e laterale, e all'interno del forame viene ancorata e protetta da uno strato di tessuto fibroso.¹⁴ Insieme al fascio vascolare del tibiale anteriore penetra, attraverso la medesima apertura, anche il vaso linfatico tibiale anteriore, il quale presenta un diametro di circa 0,6 mm. Questo vaso viene drenato nel linfonodo popliteo profondo, tuttavia a livello della membrana sono stati rilevati due piccoli linfonodi in corrispondenza del forame ovale, un linfonodo sulla superficie anteriore e uno su quella posteriore.¹⁷ Nella sua porzione distale invece, a 5 cm sopra il malleolo peroneale, la membrana presenta uno iato dovuto al passaggio del ramo perforante dell'arteria peroneale, che dalla porzione posteriore si porta nel compartimento anteriore di gamba per contribuire con i suoi rami a circa il 63% dell'irrorazione dei legamenti sindesmotici anteriori.



Figura 2. Da sinistra, aspetto anteriore e posteriore della membrana interossea crurale.

Relativamente alla lunghezza della membrana sembrano esserci risultati leggermente differenti. Secondo Morley et al.¹ la lunghezza media è di circa 28,1 cm, mentre nello studio di Driss Elamrani et al.¹⁸ questa risulta essere di circa 24,7 cm. Anche per ciò che concerne lo spessore gli studi riportano dati differenti, infatti Manyi et al.¹⁵ riferiscono uno spessore di circa 1 mm mentre Morley et al.¹ riportano che questo sia 0,26 mm prossimalmente per poi aumentare medialmente a 0,29 mm e a 0,36 mm distalmente. Tuttavia entrambi concordano sul fatto che esso tende ad aumentare in direzione prossimo-distale. Infine sembra apparire più sottile al centro rispetto ai suoi bordi tibiali e peroneali.¹⁸ Sul piano frontale la sua larghezza è maggiore a livello prossimale, circa 2,5 cm, e nei due terzi prossimali assume una forma un po' più curva, mentre distalmente la larghezza si riduce fino a 0,7 cm, e dal suo terzo distale appare pressoché piatta per via di una maggiore tensione che si genera in quella zona.^{1,15} Infine, la membrana divide la gamba in un compartimento anteriore e uno posteriore. Il compartimento anteriore è composto dai muscoli tibiale anteriore, estensore dell'alluce e delle dita e dal peroneo "tertius". Questi producono i movimenti di eversione, inversione e dorsiflessione del piede. In maniera più specifica, la membrana è punto di inserzione di questi muscoli, sia del compartimento anteriore che posteriore,

soprattutto nella sua zona prossimale.¹ Infatti, l'estensore lungo delle dita origina in gran parte dalla porzione anteriore prossimale e centrale della membrana, mentre l'origine muscolare dell'estensore comune delle dita è più ridotta.¹⁹ Il compartimento posteriore, deputato alla flessione plantare e l'inversione del piede, è composto superficialmente dal gastrocnemio e dal soleo e profondamente dal flessore lungo delle dita, dal flessore lungo dell'alluce, dal tibiale posteriore e dal popliteo. Il tibiale posteriore origina proprio dalla faccia posteriore della membrana interossea.

Organizzazione microscopica

La membrana si divide in due strati incrociati di fibre di collagene che sulle superfici presentano alcune aree di fibre muscolari. Tra i due strati, anteriore e posteriore, si trova un tessuto connettivo lasso, il quale determina un maggiore scorrimento tra gli strati stessi di collagene. Le fibre all'interno dello stesso strato sono allineate ed orientate nella stessa direzione longitudinale, obliqua e distale, mentre le fibre dello strato adiacente si orientano in una direzione differente.^{1,3,20} Infatti, all'interno dello strato

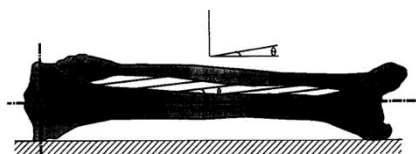


Figura 3. Orientamento delle fibre di collagene.

anteriore le fibre decorrono oblique, in direzione distale-laterale, mentre nello strato posteriore esse decorrono in direzione obliqua opposta, cioè distale-mediale.¹⁸ Inoltre le fibre, con la loro disposizione, formano degli angoli. Secondo lo studio di Driss Elamrani et al.¹⁸, le fibre dello strato anteriore formano un angolo di circa 13° con l'asse del perone, mentre quelle dello strato posteriore formano un

angolo con l'asse del perone di circa 24°. Tuttavia questo studio non ha misurato l'angolo dei due strati di collagene adiacenti. Altri studi invece concordano che questi angoli sono di circa 30° a livello prossimale e 20° a livello distale, rispetto all'asse verticale del perone, e all'aumentare del carico l'angolo tende a divenire ancora più acuto.^{1,2,5,20} Al microscopio sono state rilevate fibre elastiche. Queste erano principalmente contenute all'interno del tessuto connettivo presente tra i due strati di collagene, mentre negli strati di collagene erano quasi assenti. Relativamente all'irrorazione, con lo studio di Manyi et al.¹⁵ la membrana non mostrava strutture capillari, mentre in uno studio più recente di Morley et al.¹ al microscopio sono stati osservati dei vasi sanguigni. Essi erano presenti sia sulla superficie della membrana sia tra i due strati, così come alcuni elementi nervosi, ovvero i meccanocettori. Questi sono assenti all'interno dello strato di collagene, ma sono presenti sulla superficie di scorrimento che si trova tra i due strati e sulla superficie della membrana stessa, seppur con una disposizione variabile tra un individuo e l'altro. In aggiunta, non risulta esserci una differenza nella loro distribuzione, sono presenti sia a livello prossimale che distale. I meccanocettori rilevati sono principalmente le terminazioni nervose libere, riscontrate sulla superficie e in parte all'interno tra i due strati di collagene. A seguire poi, in termini di numerosità, sono stati i corpuscoli di Ruffini, presenti tra le superfici di scorrimento, e infine i corpuscoli di Pacini. Quest'ultimi sono stati rilevati nei punti di inserzione dei muscoli che originano dalla membrana. Tuttavia dallo studio emerge che, la resezione della muscolatura attaccata alla membrana, può aver danneggiato o eliminato altri corpuscoli di Pacini o Ruffini eventualmente presenti. Allo stesso modo, anche nella resezione dei punti di contatto tra la membrana e la tibia e il perone potrebbero essere state danneggiate, in quanto sono punti di maggior stress durante la deambulazione e quindi zone in cui queste strutture, in realtà, potrebbero essere presenti in maggior quantità.¹

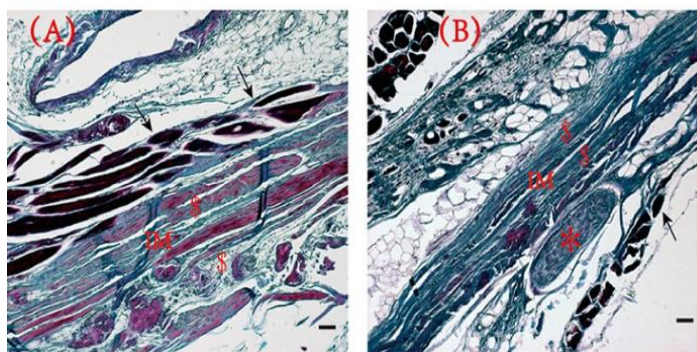


Figura 4. I due strati di collagene (§ in A, B); gli elementi nervosi (* in B); le fibre muscolari che originano dalla IOM (frecce in B).

4.2 Fisiologia

Gli studi hanno portato alla luce diversi aspetti relativi alla funzionalità della membrana interossea crurale. Il primo ruolo della membrana è collegare e stabilizzare le due ossa adiacenti, ossia tibia e perone.

Sarmiento et al.⁵ a questo proposito analizzano l'eccezionale resistenza di tale tessuto. Lo studio ha approfondito le caratteristiche meccaniche della membrana interossea, utilizzando dei campioni di arto inferiore da cadaveri. In un primo momento è stata osservata l'organizzazione della membrana, sia microscopicamente che macroscopicamente, e in seguito sono state condotte alcune prove di trazione su di essa. I risultati hanno evidenziato che la membrana interossea crurale è capace di allungarsi di circa il 120% in tensione lungo la direzione delle sue fibre prima di cedere alla rottura, e non raggiunge la massima capacità di carico fino a quando non si estende di circa il 50%. Se trazionata perpendicolarmente alle fibre invece, la membrana può allungarsi di oltre il 300% prima di cedere, ma allo stesso tempo lungo questa direzione supporta meno carico. Pertanto lo studio riporta l'elevata capacità di resistenza della membrana nel collegare e stabilizzare tibia e perone.

Successivamente, anche Minns e Hunter² hanno dimostrato il ruolo fortemente stabilizzante della membrana. Hanno raccolto campioni di membrana interossea, sezionandola sia parallelamente alle sue fibre sia perpendicolarmente. Infine queste sono state collegate a degli estensimetri, ed è stata generata una forza in due direzioni differenti. La membrana, nel momento in cui è stata trazionata parallelamente alla direzione delle sue fibre, ha avuto una capacità di allungamento del 7,7% rispetto alla sua lunghezza iniziale, prima di raggiungere il punto di rottura. Quando è stata trazionata perpendicolarmente alla direzione delle fibre invece, la sua capacità di allargamento rispetto alla larghezza iniziale, è stata del 40% prima di giungere alla rottura. Inoltre, la resistenza alla trazione parallela alle fibre è risultata 45 volte maggiore rispetto a quella perpendicolare alle fibre, ma allo stesso tempo molto meno estensibile. Questi risultati hanno dimostrato che la disposizione delle fibre caratterizza la membrana come un supporto rigido, capace di stabilizzare la tibia e il perone, e che attraverso le sue caratteristiche deformabili è in grado di sopportare un'elevata resistenza alla trazione, sia in allungamento che allargamento.

Un altro studio a supporto di questa caratteristica funzionale è quello di Daorong Xu et al.²¹ In questo articolo è stato preso in esame il comportamento biomeccanico dei legamenti sindesmotici, ovvero il legamento tibiofibulare antero-inferiore (AITFL), il legamento tibiofibulare postero-inferiore (PITFL) e la membrana interossea crurale (IOM), con lo scopo di definire il loro singolo contributo alla stabilità tibioperoneale durante il movimento rotazionale del piede in carico. È stato applicato un carico fisiologico e una forza in intrarotazione (25°) e extrarotazione (35°) della caviglia per valutare le deformazioni dei legamenti e della membrana. Dai risultati si evince che tutti e tre i legamenti hanno resistito alla torsione della sindesmosi, in particolare la membrana ha avuto un ruolo importante nel resistere ai movimenti torsionali sia in intrarotazione che in extrarotazione del piede, andando inoltre a deformarsi come un angolo obliquo, coerente alla disposizione delle sue fibre. Dunque, anche da questo studio la membrana risulta essere un importante stabilizzatore del complesso tibiofibulare in occasione di movimenti torsionali della caviglia.

Altro ruolo rappresentativo della membrana è il trasferimento e condivisione degli stress e del carico tra tibia e perone, e verosimilmente in tutto il complesso distale dell'arto inferiore. In merito a questa funzione sono presenti diversi studi, i quali mostrano anche alcuni aspetti contrastanti tra loro.

Vukicevic et al.⁴ hanno preso in esame il ruolo meccanico della membrana verificando se, e in quali modalità, tale struttura aveva modo di trasferire parte del carico al perone. Sono state utilizzate gambe da cadaveri su cui è stato simulato un carico assiale fisiologico, ed è stato osservato il comportamento della membrana intatta, poi con lesione parziale e infine totale. I risultati hanno dimostrato che, in presenza di carichi elevati (20-70kg) con la membrana intatta, il perone ha registrato una deformazione postero-laterale, mentre con la lesione parziale della membrana interossea, l'astragalo veniva caricato in maniera irregolare con un maggiore carico sulla tibia. Di fatti questo risultato viene confermato con la lesione totale della membrana, in cui la deformità postero-laterale della tibia è in un rapporto di 3:1

rispetto il perone, il quale risulta quindi alleggerito del 30%, mentre l'astragalo viene caricato sempre più in maniera irregolare. Questi risultati dimostrano quindi come la membrana trasferisca e condivida il carico tra la tibia e il perone. Allo stesso modo viene chiarito anche un altro ruolo della membrana, che sarà esposto successivamente, ovvero quello di fornire stabilità alle articolazioni adiacenti, e in particolare all'articolazione talocrurale. Nello studio, infatti, viene descritta una distribuzione alterata del carico sull'astragalo, nel quale, viene a essere addirittura modificata la sua forma a sella, causa dell'eccessivo piegamento postero-laterale della tibia dovuto all'assenza della membrana.

In accordo allo studio precedente, anche Skraba e Greenwald²² hanno dimostrato che la membrana interossea crurale funge da condotto per la trasmissione dei carichi al perone, illustrandone questa volta il ruolo funzionale durante il carico. Nello studio sono stati utilizzati carichi in direzione longitudinale e diverse posizioni dell'articolazione della caviglia che simulassero una normale deambulazione. Un arto è stato valutato con la membrana intatta, il secondo è stato privato della membrana e il terzo è stato esaminato prima con la membrana e poi senza. Nella seconda prova l'esito ha mostrato una deformazione inesistente del perone, evidenziando che in assenza della membrana non veniva trasmesso alcun carico ad esso. Anche i dati ricavati dalla terza prova hanno confermato i medesimi risultati. Infatti, dopo la resezione della membrana, la deformazione al carico del perone è diminuita in tutte le posizioni articolari di oltre il 50%. A differenza però dello studio precedente, in cui si riteneva che il perone venisse alleggerito del 30% del carico, questo riporta una riduzione della deformazione del perone di oltre il 50% in tutte le misurazioni registrate dopo la resezione della membrana. Ad ogni modo è concorde sul ruolo della membrana nel contribuire alla trasmissione degli stress al perone, questa volta però durante la simulazione della deambulazione, giocando quindi un ruolo attivo nella funzione tibiofibulare. Tuttavia esso presenta alcuni limiti. Il primo è relativo al carico, in quanto non è stato accertato il carico esatto che ha determinato la trasmissione dello stress al perone. Inoltre, trattandosi di carichi e posizioni articolari simulate, non si conoscono gli effetti dinamici che in realtà si potrebbero avere sulla funzione della membrana, e il ruolo che potrebbero giocare su di essa i tessuti molli, come i muscoli per esempio.

I risultati finora esposti sono per qualche aspetto in contrasto con lo studio di Thomas Ka.²³ In questo studio è stato applicato un carico assiale e i campioni sono stati testati in varie posizioni della tibio-tarsica e sottoastragalica, prima e dopo la sezione della membrana. In assenza di quest'ultima, la deformità del perone si è modificata da antero-laterale a postero-laterale, mostrando la capacità della membrana nel frenare la deflessione postero-laterale sia del perone che della tibia. Questo risultato è in linea con lo studio di Skraba e Greenwald, in cui si è descritto l'altra funzione della membrana, ovvero quella di stabilizzare tibia e il perone, dal momento che anche qui si riferisce come ruolo primario quello di controllare il piegamento postero-laterale delle due ossa sottoposte al carico. Tuttavia, c'è un aspetto in contrasto con i due studi precedenti. Lo studio ha dimostrato che seppur la membrana, in condizioni fisiologiche, ridistribuisca il carico tra tibia e perone, in sua assenza il carico fibulare non si è azzerato ma soltanto ridotto, a differenza degli altri studi.

Nello studio di Wang Qian et al.²⁴ gli autori hanno approfondito la relazione tra il carico e la migrazione del perone, la condivisione del carico tra tibia e perone e il ruolo della membrana interossea e del legamento tibiofibulare inferiore nella stabilità della caviglia. A questo proposito sono stati condotti dei test con carico assiale crescente e in differenti posizioni articolari della caviglia. I risultati hanno dimostrato due compiti a cui assolve questa struttura interossea. Da una parte è emerso nuovamente il ruolo della membrana nel fornire stabilità all'articolazione della caviglia, dall'altra il ruolo nella trasmissione del carico tra tibia e perone. La stabilità della caviglia è data dal movimento del malleolo peroneale, il quale con il carico è migrato distalmente in tutte le condizioni, andando a produrre tensione nella membrana interossea. La membrana a sua volta, tirando il perone verso la tibia, è andata a stabilizzare l'articolazione talocrurale. Il ruolo nella trasmissione dei carichi invece è stato notato attraverso l'osservazione del perone distale che, con la membrana interossea intatta, ha assunto una maggiore proporzione del carico rispetto a quello prossimale, rispettivamente 20% e 14%, con una tensione visibile all'interno delle fibre della membrana interossea. Nel momento in cui è stata eliminata

la membrana, la differenza tra la zona prossimale e quella distale della fibula è scomparsa, dimostrando che, in condizioni fisiologiche, la tensione che si verifica nella membrana interossea determina la condivisione del carico tra il perone e la tibia.

Un altro compito a cui assolve la membrana appunto è stabilizzare le articolazioni adiacenti, quali tibiofibulare prossimale (PTFJ) e talocrurale.

Lo studio di Teresa Alves da Silva et al.²⁵ ha indagato come la mobilità dell'articolazione tibiofibulare prossimale (PTFJ) sia influenzata dall'integrità dei legamenti circostanti e dalla posizione delle articolazioni adiacenti. Sono stati sezionati in sequenza il legamento tibiofibulare prossimale anteriore (APTFL), il legamento tibiofibulare prossimale posteriore (PPTFL) e infine la membrana interossea (IOM), fino al bordo superiore del legamento trasverso tibiofibulare distale. L'arto inferiore è stato poi mobilizzato manualmente, in assenza di carico, con movimenti a livello del ginocchio, piede e caviglia. Dopo la sezione dell'IOM, l'inversione ed eversione del piede hanno determinato un significativo spostamento dell'articolazione tibioperoneale prossimale, così come per l'intrartotazione ed extrarotazione del ginocchio. Inoltre, dopo la lesione della membrana e con la manipolazione manuale sia anteriore che posteriore della testa del perone, c'è stato un aumento di mobilità significativo a livello dell'articolazione, dimostrando pertanto la sua capacità di stabilizzare questa struttura. Lo studio ha quindi riportato per la prima volta il comportamento della membrana come stabilizzatrice significativa della PTFJ nei movimenti rotazionali di ginocchio e della caviglia. Tuttavia sono presenti alcuni limiti dello studio, quali l'assenza di carico, i campioni da cadavere e infine la sezione cumulativa dei legamenti che non permettono di indagare al meglio l'effettiva mobilità di quest'articolazione.

Anche nello studio precedente di Vukicevic et al.⁴ viene rilevato il ruolo di stabilizzatrice dell'articolazione tibiofibulare prossimale. Nel primo test, in cui la gamba conserva la membrana ed è sottoposta a piccoli carichi assiali, il perone non presenta una deformazione postero-laterale grazie proprio alla libertà di movimento dell'articolazione tibiofibulare prossimale. All'aumentare del carico però, la tibia viene trazionata in basso, e con sé anche la membrana. Quest'ultima va a trazionare a sua volta il perone, limitando la libertà di movimento di risalita dell'articolazione tibioperoneale prossimale. A conferma di ciò infatti il perone, nel momento in cui viene applicato il carico sulla gamba privata della membrana crurale, viene alleggerito del carico e risale attraverso la PTFJ. Questo dimostra il ruolo che la membrana assolve nel fornire stabilità all'articolazione tibiofibulare prossimale quando la gamba è sottoposta a un carico.

In accordo con questa funzionalità c'è anche lo studio di Asa et al.²⁶ in cui è stato approfondito per la prima volta il ruolo della lunghezza di amputazione sotto il ginocchio e della vitalità della membrana sulla cinematica della PTFJ. I pazienti sottoposti a questo tipo di amputazione vanno incontro ad una comune complicanza, quale l'abduzione fibulare, dovuta probabilmente a una contrazione del bicipite femorale che, in assenza della rigida sindesmosi tibiofibulare distale, crea forze maggiori rispetto al contributo della membrana interossea rimanente. Sono state create quattro condizioni: due amputazioni lunghe e due amputazioni corte, entrambe rispettivamente prima con IOM intatta e poi sezionata. È stato dimostrato un effetto significativo dell'integrità della membrana, in quanto l'angolo di abduzione fibulare, nei pazienti con amputazione lunga e IOM sezionata, era maggiore rispetto ai pazienti con IOM integra e amputazione lunga. Inoltre questo spostamento era maggiore anche rispetto a pazienti con amputazione corta ma con IOM integra, dimostrando quindi che l'interruzione della membrana aumenta l'abduzione fibulare indipendentemente dalla lunghezza dell'amputazione. Deve essere considerato però che il movimento tibiofibulare descritto è stato determinato da una singola forza, mentre in condizioni normali il movimento anormale della fibula potrebbe essere causato anche da altri tipi di forze, quali per esempio le forze di reazione al suolo. Tuttavia, come per lo studio precedente, anche questo evidenzia l'importanza della membrana crurale nel mantenere una connessione resistente tra la tibia e il perone e di stabilizzare il movimento dell'articolazione tibiofibulare prossimale.

Alcuni studi riportano la capacità della membrana interossea di stabilizzare anche l'articolazione della caviglia, come già riportato precedentemente dagli studi di Vukicevic et al.⁴ e Wang Qian et al.²⁴ Scranton et al.²⁰, in una revisione sistematica risalente al 1976, aveva già rilevato un possibile ruolo della membrana nella stabilità della caviglia. I risultati hanno dimostrato che, durante le fasi di spinta e appoggio del cammino, i muscoli flessori del piede trazionano il perone verso il basso. Il movimento del perone in basso rende il mortaio più profondo, ma allo stesso tempo il perone si sposta anche medialmente stringendo la membrana, la quale presenterà un angolo delle sue fibre ancora più acuto. La tensione della membrana, unita all'articolazione talocrurale più profonda, fornisce un supporto aggiuntivo per l'articolazione talocrurale stessa. Lo studio definisce la membrana come un elemento chiave per la stabilità laterale della caviglia nelle fasi di push-off e appoggio della deambulazione. Questi risultati sono pertanto in accordo con lo studio di Wang Qian et al.²⁴ dove però tuttavia l'effetto di migrazione del perone non è dato dalla contrazione muscolare ma dal carico assiale.

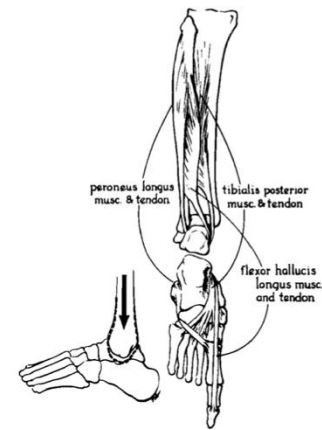


Figura 5. Meccanismo muscolare di migrazione distale del perone.

Lo studio di Boden et al.¹⁰ si aggiunge a supporto di questa tesi evidenziando anch'esso l'importanza della membrana all'interno della stabilità della caviglia. Il piede è stato portato in extrarotazione associato a pronazione, e successivamente caricato per raggiungere la rottura della sindesmosi e della membrana crurale. Il primo gruppo è stato sezionato in sequenza a partire dal legamento deltoideo, poi la sindesmosi e infine la membrana interossea. Il secondo gruppo ha conservato il legamento deltoideo intatto fino alla fase finale, dove poi è stato lesionato. I risultati hanno dimostrato che, in questo tipo di lesione, se il legamento deltoideo era intatto, la lesione della membrana e della sindesmosi non hanno determinato un allargamento significativo della sindesmosi. La lesione del legamento deltoideo, successiva alla lesione della IOM, ha portato invece ad un maggior allargamento del mortaio, il quale era direttamente correlato all'entità di rottura della membrana. Lo studio dimostra che in assenza del legamento deltoideo, la membrana interossea di gamba è un importante stabilizzatore dell'articolazione della caviglia.

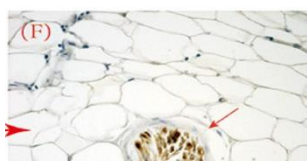
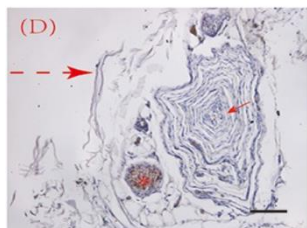
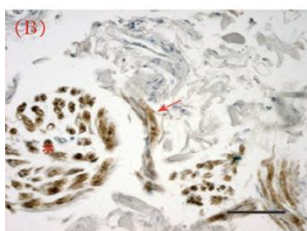


Figura 6. IOM al microscopio: terminazioni nervose libere (freccie in B); Pacini (freccie in D); Ruffini (freccie in F).

Infine un'ulteriore capacità che risiede nella membrana interossea è quella non solo di suddividere i muscoli del compartimento anteriore e posteriore, ma probabilmente di partecipare al ruolo propriocettivo dell'arto inferiore.

Lo studio di Morley et al.¹ ha analizzato alcune membrane interossee crurali con l'analisi istologica. Sono stati ricercati vasi, fibre elastiche e collagene al microscopio ottico, mentre i meccanocettori sono stati contati in sezioni seriali colorate attraverso metodi immunocitochimici. Gli esiti dello studio hanno rilevato uno strato di collagene il quale, in accordo con i risultati degli studi precedenti, per le sue proprietà, è coerente con la capacità della membrana nella trasmissione delle forze lungo la direzione longitudinale delle fibre tra tibia e perone. Allo stesso modo anche la presenza di fibre elastiche e tessuto connettivo lasso è coerente con il ruolo della membrana di consentire la sua adattabilità in direzione trasversale, mentre l'ispessimento a livello distale indica la sua capacità di partecipare alla stabilità dell'articolazione della caviglia. In conclusione, sono stati ritrovati sulle superfici di scorrimento dei corpuscoli di Ruffini, ma soprattutto numerose terminazioni nervose libere, le quali possono agire da meccanocettori, nocicettori o in maniera polimodale. Infatti, la loro presenza dimostra la capacità di avvertire il cambiamento di tensione nella membrana interossea durante la deambulazione, probabilmente ciò è dovuto all'azione delle inserzioni muscolari presenti a questo livello. All'interno del tessuto

connettivo lasso e all'inserzione dei muscoli che originano dalla membrana sono stati registrati alcuni corpuscoli di Pacini. Questi invece possono percepire variazioni della pressione meccanica che si verificano nella membrana durante il cammino. Quando i muscoli del compartimento si contraggono e si modifica la lunghezza della membrana, la presenza di meccanocettori comunicherà con il sistema nervoso centrale regolando l'attivazione muscolare dei muscoli dei compartimenti. Questo studio suggerisce un ruolo della membrana di coordinazione motoria, propriocezione e stabilità tibioperoneale durante la deambulazione. Tuttavia dallo studio emerge la necessità di applicare questi risultati in futuri studi considerando le condizioni di carico dinamico, per determinare al meglio le proprietà biomeccaniche della membrana crurale.

5. Discussione

La membrana interossea crurale può danneggiarsi a seguito di un trauma. Questo può verificarsi durante alcune attività come correre, giocare a calcio, cadere o scendere le scale.¹⁵ Tali lesioni, molto spesso, sono difficili da valutare e di conseguenza da trattare. Inoltre, la loro risoluzione può richiedere più tempo e possono essere dannose per il corretto funzionamento e la biomeccanica della caviglia, e in generale della parte inferiore della gamba. Il suo preciso ruolo fisiologico e la sua organizzazione anatomica non hanno ricevuto molta attenzione in letteratura, e per di più c'è poco accordo riguardo alcune caratteristiche anatomiche e funzionali. Per valutare, trattare e gestire una lesione a carico della membrana, è estremamente importante che si abbia una conoscenza approfondita dell'anatomia e della biomeccanica. L'aspetto macroscopico è stato analizzato meno rispetto quello microscopico, il quale è sicuramente più discusso. La lunghezza è definita da dati differenti, ma si ritiene compresa tra 24 cm e 28 cm. Anche per ciò che concerne lo spessore si riportano dati differenti, tuttavia gli studi concordano che questo però aumenti in direzione prossimo-distale.^{1,15} È più larga a livello prossimale mentre si riduce distalmente, dove presenta una forma più piatta, ciò è coerente con la maggiore tensione che si genera in questa zona per via della sua funzione di stabilizzare l'articolazione della caviglia.^{1,4,10,15,20,24} In particolare la membrana stabilizza le articolazioni adiacenti, quale appunto la caviglia e la tibiofibulare prossimale. Relativamente al distretto della caviglia, la stabilità è data sia in condizioni di carico assiale statico, dovuta alla migrazione distale del perone, sia in condizioni di carico "dinamico".^{4,24} In quest'ultimo il perone è però trazionato non dal carico ma bensì dall'attività dei muscoli, durante le fasi di push-off e appoggio nella deambulazione. Durante queste fasi la membrana è messa in tensione dalla migrazione del perone, e in tal modo avvicina tibia e perone stabilizzando l'articolazione talocrurale.²⁰ Secondo alcuni autori partecipa alla stabilità di questo complesso articolare anche durante i movimenti rotazionali del piede in carico, dimostrandosi un'importante stabilizzatore in assenza del legamento deltoideo.^{10,21} Anche l'articolazione tibiofibulare prossimale viene contenuta dalla membrana interossea, sia durante i movimenti torsionali di piede e di ginocchio in assenza di carico, sia durante un carico statico in cui va a limitare il movimento di risalita verso l'alto del perone.^{4,25,26} All'analisi microscopica si presenta suddivisa in due strati di collagene, tra i quali è presente tessuto connettivo lasso che ne aumenta lo scorrimento, e in cui vi è una presenza di fibre elastiche.¹ Lo strato anteriore presenta una direzione delle fibre distale-laterale e obliqua, mentre quello posteriore è distale-mediale e più verticale, orientandosi per cui in direzione opposta.^{1,3, 18,20} All'interno dello stesso strato le fibre sono altamente allineate tra loro e descrivono angoli acuti maggiori a livello prossimale (30°) rispetto a quelli a livello distale (20°).³ La presenza di fibre di collagene, e il loro notevole allineamento, dimostra la capacità di resistenza di questo tessuto nella direzione con cui si orientano le fibre stesse, ovvero longitudinale e trasversale. La membrana infatti non ha soltanto la capacità di collegare, ma anche di stabilizzare tibia e perone, resistendo alle forze di trazione che si generano all'aumento del carico durante la deambulazione. Infatti, sotto carico la membrana presenterà degli angoli ancora più acuti e andrà a controllare e limitare il piegamento postero-laterale della tibia e del perone, dovuto proprio all'aumento del carico stesso.^{2,4,5,20,23} La presenza di fibre elastiche nel tessuto connettivo invece, permette un certo grado di adattabilità trasversale della membrana durante le trazioni laterali in carico, quali movimenti rotazionali della caviglia, mantenendo in stretto contratto tibia e perone.^{2,5,21} L'organizzazione e composizione delle fibre definisce la capacità della membrana nella condivisione del carico tra le due ossa sia durante un carico statico che durante la deambulazione, mettendo in risalto non soltanto la sua funzionalità meccanica ma anche funzionale.^{4,22, 23,24} Di recente scoperta è la presenza di meccanocettori all'interno della membrana, in realtà questi potrebbero essere presenti in maggiori quantità in vivo. Tuttavia la loro presenza suggerisce un ruolo della membrana di coordinazione motoria, propriocezione e stabilità tibioperoneale durante la deambulazione e attività che coinvolgono il distretto gamba-piede.¹ Questi studi però presentano alcuni limiti, tra cui il numero di campioni spesso ridotto, ma soprattutto si tratta di studi in vitro, in cui le posizioni articolari e i carichi sono soltanto una simulazione. Pertanto non si

conosce cosa avverrebbe realmente durante una situazione di carico con il contributo di altri tessuti, quali quelli muscolari per esempio. Oltre l'anatomia e la biomeccanica, anche l'esatta altezza ed estensione della lesione della membrana interossea, nonché i tempi per la sua restituzione come elemento funzionale, sono conoscenze essenziali per la pianificazione accurata del trattamento. Ad oggi la letteratura suggerisce alcuni metodi di indagine. La radiografia è uno strumento di misurazione indiretto, utile nei casi di lesioni moderate-gravi della sindesmosi, in quanto crea il sospetto di lesione della membrana grazie all'eccessivo allargamento della sindesmosi. Le lesioni della membrana possono essere identificate in maniera efficace attraverso RMN ed ecografia, sia che siano associate o meno a fratture come quella di Maisonneuve o a lesioni del complesso della sindesmosi, consentendo una precoce diagnosi e un adeguato trattamento.^{27,28} Le indagini diagnostiche vengono associate all'esame obiettivo, il quale terrà in considerazione il meccanismo traumatico (extrarotazione piede o dorsiflessione), i sintomi riferiti dal paziente e i risultati ottenuti da alcuni test (external rotation, squeeze test, dorsiflexion compression test). La risonanza magnetica (RMN) è altamente capace di rilevare non solo la lesione della IOM ma anche l'entità del danno. Questa indagine illustra la membrana intatta con un segnale a bassa intensità in T1, mentre una lesione parziale viene descritta con un aspetto ondulato, circondato da segnali ad alta intensità dovuti all'edema. Infine, una lesione totale si presenta come un segnale ad alta intensità che interrompe quello a bassa intensità della membrana circostante.^{11,15} Anche l'ecografia dovrebbe essere tenuta in considerazione, in quanto non solo permette in maniera affidabile di valutare il danno, ma rispetto alla RMN è sicuramente meno costosa, meno invasiva e più ripetibile. In condizioni fisiologiche, la membrana interossea in ecografia si presenta iperecogena. In caso di danno, che può verificarsi sia nella porzione più distale sia prossimalmente alla rima di frattura alta del perone, il suo aspetto è discontinuo e ipoecogeno rispetto al tessuto intatto. Infine, in via di guarigione avrà un aspetto misto di aree ipo e ipercogene.^{27,28} Molto spesso un danno a carico della membrana si verifica a seguito di un trauma importante della caviglia, che coinvolge in primis i legamenti della sindesmosi. Pertanto gli studi si concentrano su un trattamento volto al ripristino della stabilità della caviglia, attraverso l'utilizzo di viti per la fissazione chirurgica della sindesmosi.¹¹ Dalla letteratura non ci sono linee guida su quanto debba essere lo spostamento del perone per richiedere una fissazione chirurgica al fine di ristabilire la stabilità articolare, ma il Torque Test intraoperatorio (TT) sembra definire questo parametro.²⁹ L'utilizzo delle viti limita il carico in quanto queste potrebbero andare incontro a rottura o allentamento e causare dolore. Per questo motivo suggeriscono di limitare le attività e aspettare a concedere il carico per un lasso di tempo di 8-12 settimane, in quanto la membrana sembra richiedere un tempo di guarigione di circa tre mesi.^{11,27}

6. Conclusioni

Nonostante ci sia ancora poca conoscenza riguardo le caratteristiche anatomiche e fisiologiche della membrana interossea crurale, e gli studi siano condotti su cadaveri, quindi i risultati non sono stati rilevati in condizioni fisiologiche e dinamiche, dalla revisione della letteratura emergono differenti capacità della stessa. Dalle lesioni a carico della membrana, potrebbero scaturirne sintomi insidiosi e progressivi quali edema, dolore a carico della caviglia o laterale di ginocchio o della gamba. Il dolore può manifestarsi soprattutto in attività stressanti per il tessuto come la flessione o i movimenti di rotazione del piede, il portarsi sulle punte, il camminare o saltare. Inoltre può instaurarsi un'instabilità a carico delle articolazioni adiacenti quali caviglia e ginocchio, una mancanza di condivisione dei carichi tra le due ossa, esponendo per cui a maggiori stress la tibia, con possibili ripercussioni cliniche in particolare dolore, gonfiore, alterazioni a carico del tessuto osseo e dei tessuti circostanti come i muscoli. Il carico irregolare, così come l'instabilità cronica, potrebbe poi nel lungo termine creare danni a carico della cartilagine articolare e portare a condizioni di osteoartrosi. Infine dato il suo probabile ruolo propriocettivo, potrebbe essere condizionato anche l'aspetto di coordinazione motoria e instabilità dell'arto inferiore. Tutto ciò può avere un impatto importante sulla qualità di vita della persona. Pertanto gli aspetti riabilitativi, in caso di lesione a carico di questa struttura, sono stati definiti sulla base di questi risultati. L'approccio riabilitativo sarà individuale, poiché costruito sulla presentazione clinica, gli obiettivi e il contesto di vita del paziente. Gli obiettivi da perseguire dovrebbero comprendere la desensibilizzazione, il recupero dell'intera funzionalità articolare attraverso il ripristino del ROM completo, la forza e la propiocezione, secondo il principio dell'optimal load. A questo proposito durante il percorso sarà utile: monitorare i sintomi, sia durante che dopo le attività, osservare l'esecuzione dell'esercizio e valutare le strutture anche mediante la palpazione, i test di stress e le attività funzionali di carico, come portarsi sulle punte oppure, in fase più avanzata, gli Hop test. Questo servirà per capire se il trattamento sta proseguendo verso la giusta direzione o necessita di una modifica dei parametri, ricordando tuttavia che il percorso riabilitativo può essere lungo. Nella prima fase si dovrà proteggere e desensibilizzare i tessuti attraverso l'educazione, la gestione del carico, sia limitando i movimenti provocativi che possono sollecitare eccessivamente il tessuto sia durante la deambulazione, e infine con la terapia manuale mediante tecniche di mobilizzazione di I-II grado delle articolazioni adiacenti e il trattamento dei tessuti molli. Per ridurre al minimo la debolezza muscolare e la perdita del movimento articolare, si potranno introdurre esercizi di rinforzo isometrico e di mobilità articolare in scarico di piede, caviglia e ginocchio. La progressione, una volta che il dolore si sarà attenuato, sarà rivolta a un recupero completo del movimento articolare, della forza e funzionalità nelle ADL. In questa fase si potrà ricorrere a tecniche di grado III per recuperare completamente l'articolazione, mentre l'esercizio terapeutico sarà indirizzato a esercizi più funzionali come heel rise, lunge, squat stimolando i tessuti in maniera differente, sia per favorire la guarigione sia per evitare sovraccarichi. La progressione mirerà inizialmente al recupero della forza di endurance (bassi carichi ed elevato numero di ripetizioni) e poi della forza massima (alti carichi e basso numero di ripetizioni), attraverso posizioni articolari sempre più provocative. Infine, per le proprietà mostrate dalla membrana, è fondamentale l'allenamento propriocettivo stimolando la struttura con esercizi di equilibrio statico e dinamico in progressione su superfici instabili, incrementando i livelli di difficoltà, per esempio ad occhi chiusi, in monopodalica oppure con la richiesta di più task motori monitorando le capacità di controllo motorio. L'obiettivo finale sarà reinserire il paziente nel proprio contesto di vita. Trattandosi di una struttura ad elevata resistenza, per ottenere un completo recupero, bisognerà sollecitarla con attività altrettanto intense, scelte anche sulla base delle attività quotidiane del paziente. Per cui si dovranno introdurre attività sport specifiche, salti, corsa e valutare l'outcome tramite l'assenza dei sintomi, quale dolore e instabilità durante la loro esecuzione. Ulteriori studi potranno definire in maniera più chiara un protocollo riabilitativo volto al ripristino della funzionalità della membrana interossea di gamba.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Morley J, Fan C, McDermott K, Fede C, Hughes E, Stecco C. The crural interosseous membrane re-visited: a histological and microscopic study. *Eur J Transl Myol.* 2019 Aug 9;29(3):8340. doi: 10.4081/ejtm.2019.8340
2. Minns RJ, Hunter JA. The mechanical and structural characteristics of the tibio-fibular interosseous membrane. *Acta Orthop Scand.* 1976 Apr;47(2):236-40. doi: 10.3109/17453677608989725
3. Murali SR, Aspden RM, Hutchison JD, Scott JM. Collagen organization in the crural interosseous membrane and its relationship to fibular osteotomy. *Injury.* 1994 May;25(4):247-9. doi: 10.1016/0020-1383(94)90072-8
4. Vukicević S, Stern-Padovan R, Vukicević D, Keros P. Holographic investigations of the human tibiofibular interosseous membrane. *Clin Orthop Relat Res.* 1980 Sep;(151):210-4. PMID: 7418307
5. Sarmiento, Augusto M.D.; Latta, Loren; Zilioli, Armand M.D.; Sinclair, William C.P.O. The Role of Soft Tissues in the Stabilization of Tibial Fractures, *Clinical Orthopaedics and Related Research: November 1974 - Volume 105 - Issue - p 116-129*
6. Alves-da-Silva T, Guerra-Pinto F, Matias R, Pessoa P. Kinematics of the proximal tibiofibular joint is influenced by ligament integrity, knee and ankle mobility: an exploratory cadaver study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2019 Feb;27(2):405-411. doi: 10.1007/s00167-018-5070-8
7. Van Seymortier P, Ryckaert A, Verdonk P, Almqvist KF, Verdonk R. Traumatic Proximal Tibiofibular Dislocation. *The American Journal of Sports Medicine.* 2008;36(4):793-798. doi:10.1177/0363546507312162
8. Hopkinson WJ, St Pierre P, Ryan JB, Wheeler JH. Syndesmosis sprains of the ankle. *Foot Ankle.* 1990 Jun;10(6):325-30. doi: 10.1177/107110079001000607.
9. Postacchini R, Carbone S, Mastantuono M, Della Rocca C, Postacchini F. Ossification of the Interosseous Membrane of the Leg in a Football Player: Case Report and Review of the Literature. *Case Rep Orthop.* 2016;2016:2930324. doi: 10.1155/2016/2930324.
10. Boden SD, Labropoulos PA, McCowin P, Lestini WF, Hurwitz SR. Mechanical considerations for the syndesmosis screw. A cadaver study. *J Bone Joint Surg Am.* 1989 Dec;71(10):1548-55. PMID: 2512295.
11. Yu GS, Lin YB, Xiong GS, Xu HB, Liu YY. Diagnosis and treatment of ankle syndesmosis injuries with associated interosseous membrane injury: a current concept review. *Int Orthop.* 2019 Nov;43(11):2539-2547. doi: 10.1007/s00264-019-04396-w

12. Frater C, Van Gaal W, Kannangara S, Van der Wall H. Scintigraphy of injuries to the distal tibiofibular syndesmosis. *Clin Nucl Med.* 2002 Sep;27(9):625-7. doi: 10.1097/00003072-200209000-00003
13. Mulligan EP. Evaluation and management of ankle syndesmosis injuries. *Phys Ther Sport.* 2011 May;12(2):57-69. doi: 10.1016/j.ptsp.2011.03.001
14. Ebraheim NA, Lu J, Hao Y, Biyani A, Yeasting RA. Anterior tibial artery and its actual projection on the lateral aspect of the tibia: a cadaveric study. *Surg Radiol Anat.* 1998;20(4):259-62. doi: 10.1007/BF01628486
15. Manyi W, Guowei R, Shengsong Y, Chunyan J. A sample of Chinese literature MRI diagnosis of interosseous membrane injury in Maisonneuve fractures of the fibula. *Injury.* 2000 Sep;31 Suppl 3:C107-10. doi: 10.1016/s0020-1383(00)80038-8
16. Bartoníček J. Anatomy of the tibiofibular syndesmosis and its clinical relevance. *Surgical and Radiologic anatomy.* 2003 Dec 1;25(5-6):379-86.
17. Pan WR, Zeng FQ, Wang DG, Qiu ZQ. Perforating and deep lymphatic vessels in the knee region: an anatomical study and clinical implications. *ANZ J Surg.* 2017 May;87(5):404-410. doi: 10.1111/ans.13893
18. Elamrani D, Aumar A, Wavreille G, Fontaine C. Comparative morphometry of the antebrachial and crural interosseous membranes: preliminary study for the use of the crural interosseous membrane in the surgical repair of the antebrachial interosseous membrane tears. *Surg Radiol Anat.* 2014 May;36(4):333-9. doi: 10.1007/s00276-013-1199-9
19. Hakim SG, Tehrany AS, Wendlandt R, Jacobsen HC, Trenkle T, Sieg P. The impact of harvest length and detachment of the interosseous membrane on donor-site morbidity following free fibula flap surgery-a biomechanical experimental study. *J Craniomaxillofac Surg.* 2018 Nov;46(11):1939-1942. doi: 10.1016/j.jcms.2018.09.003
20. Scranton PE Jr, McMaster JG, Kelly E. Dynamic fibular function: a new concept. *Clin Orthop Relat Res.* 1976 Jul-Aug;(118):76-81. PMID: 954295.
21. Xu D, Wang Y, Jiang C, Fu M, Li S, Qian L, Sun P, Ouyang J. Strain Distribution in the Anterior Inferior Tibiofibular Ligament, Posterior Inferior Tibiofibular Ligament, and Interosseous Membrane Using Digital Image Correlation. *Foot Ankle Int.* 2018 May;39(5):618-628. doi: 10.1177/1071100717753160
22. Skraba JS, Greenwald AS. The role of the interosseous membrane on tibiofibular weightbearing. *Foot Ankle.* 1984 May-Jun;4(6):301-4. doi: 10.1177/107110078400400605
23. Thomas KA, Harris MB, Willis MC, Lu Y, MacEwen GD. The effects of the interosseous membrane and partial fibulectomy on loading of the tibia: a biomechanical study. *Orthopedics.* 1995 Apr;18(4):373-83. PMID: 7603921.
24. Wang Q, Whittle M, Cunningham J, Kenwright J. Fibula and its ligaments in load transmission and ankle joint stability. *Clin Orthop Relat Res.* 1996 Sep;(330):261-70. doi: 10.1097/00003086-199609000-00034

25. Alves-da-Silva T, Guerra-Pinto F, Matias R, Pessoa P. Kinematics of the proximal tibiofibular joint is influenced by ligament integrity, knee and ankle mobility: an exploratory cadaver study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2019 Feb;27(2):405-411. doi: 10.1007/s00167-018-5070-8
26. Asa B, Payne MW, Wilson TD, Dunning CE, Burkhart TA. In vitro biomechanical evaluation of fibular movement in below knee amputations. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2014 May;29(5):551-5. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2014.03.005
27. Christodoulou G, Korovessis P, Giarmenitis S, Dimopoulos P, Sdougos G. The use of sonography for evaluation of the integrity and healing process of the tibiofibular interosseous membrane in ankle fractures. *J Orthop Trauma.* 1995 Apr;9(2):98-106. doi: 10.1097/00005131-199504000-00002
28. Durkee NJ, Jacobson JA, Jamadar DA, Femino JE, Karunakar MA, Hayes CW. Sonographic evaluation of lower extremity interosseous membrane injuries: retrospective review in 3 patients. *J Ultrasound Med.* 2003 Dec;22(12):1369-75. doi: 10.7863/jum.2003.22.12.1369.
29. Gosselin-Papadopoulos N, Hébert-Davies J, Laflamme GY, Beauséjour M, Ménard J, Leduc S, Nault ML. Intraoperative Torque Test to Assess Syndesmosis Instability. *Foot Ankle Int.* 2019 Apr;40(4):408-413. doi: 10.1177/1071100718816674.