

Presentazione

Il piede è l'oggetto di più frequente impegno in attività sportive diventando lo strumento della successione del gesto atletico. «Oggetto» in quanto morfologicamente definito come entità anatomica e «strumento» poiché, come struttura interposta tra uomo e ambiente, è la sede delle variazioni vincolari starterizzando la chiusura della catena cinetica dell'arto inferiore permettendo così la realizzazione dell'atto agonistico in funzione della gravità e della integrazione neuromotoria. La gravità è la forza motrice per eccellenza e ai muscoli si chiede, in particolare, di modulare il rapporto tra energia potenziale, concentrata nel baricentro, ed energia cinetica a destabilizzazione del baricentro stesso.

Il piede con notevole rappresentazione propriocettiva e a maggiore estensione, rispetto alla mano, della zona di rappresentazione corticale sensitiva, è la più importante interfaccia a partenza disto-prossimale dei biofeedback segmentari dell'arto che convergono alla stabilizzazione dell'arto stesso.

Proprio nei tendini del complesso caviglia piede si ritrovano problematiche simbolo di disfunzioni discendenti e ascendenti che colpiscono frequentemente gli atleti. I tendini sono strumenti fondamentali per la trasmissione e la regolazione dei gesti motori dai muscoli alle strutture ossee.

Il tessuto tendineo ha caratteristiche particolari che lo rendono resistente più dell'acciaio e allo stesso tempo molto flessibile e funzionale per la realizzazione di innumerevoli azioni motorie, ma anche per la salvaguardia di tutto il delicato equilibrio morfologico-strutturale di ogni atleta.

Per tale ragione è molto importante cercare di attuare una prevenzione, una corretta diagnosi ed un'adeguata terapia nelle disfunzioni tendinee, visto che colpiscono molti atleti di ogni età dagli adolescenti ai soggetti anziani che sempre di più praticano discipline sportive.

Il ruolo del podologo è anche quello d'intervenire al fianco di medici dello sport, ortopedici, fisiatri e di altre figure sanitarie, per cercare di mettere in atto misure preventive-educazionali (come nella scelta delle calzature) o terapeutiche come l'applicazione di protocolli riabilitativi o la preparazione di ortesi, specifiche per ogni soggetto e per ogni disciplina sportiva.

I tendini sono strutture anatomiche interposte tra i muscoli e le ossa che trasmettono all'osso la forza creata a livello muscolare e rendono possibile il movimento articolare. Fondamentalmente ogni muscolo possiede due tendini, uno prossimale e uno distale. Il punto di unione con il muscolo viene definito giunzione miotendinea (MTJ) ed il punto di unione con l'osso viene definita giunzione osteotendinea (OTJ). L'inserzione del tendine prossimale di un muscolo all'osso viene denominata origine muscolare e quella del tendine distale è definita inserzione.

Capitolo 1 Anatomia e fisiologia dei tendini umani

▪ Struttura dei tendini umani

○ Ventre tendineo

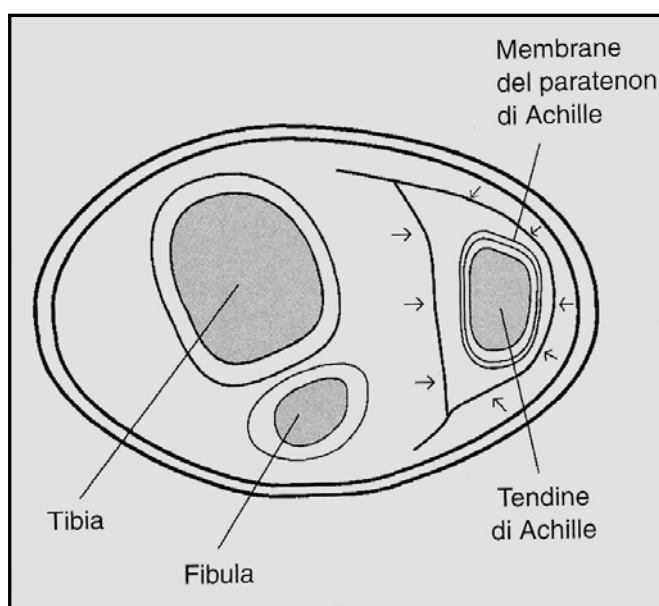
I tendini sani sono strutture di colore bianco brillante ed hanno una struttura fibroelastica, che mostra grande resistenza ai carichi meccanici, possono variare considerevolmente per la forma e per il modo in cui sono uniti all'osso, variando da tendini larghi e piatti a tendini cilindrici, a ventaglio e a nastro. I muscoli destinati a creare potenti forze di resistenza, possiedono tendini corti e larghi, mentre i muscoli che eseguono movimenti minimi e delicati possiedono tendini lunghi e sottili. La giunzione miotendinea mostra differenze anatomiche tra i vari muscoli. L'inserzione termino-terminale tra un muscolo e il suo tendine è tipica per i muscoli ampi, mentre l'inserzione laterale (in cui una parte del ventre muscolare si unisce al tendine obliquamente) è tipica dei muscoli lunghi.

Le strutture che circondano i tendini possono essere distinte in cinque categorie:

- 1) Le *guaine fibrose* sono i canali attraverso i quali passano i tendini nel loro decorso. Questi sono i tendini che devono percorrere una certa distanza prima di raggiungere le proprie inserzioni. Senza i solchi ed i canali ossei, l'attrito potrebbe considerevolmente alterare il loro decorso. I canali ed i solchi generalmente sono rivestiti da un pavimento fibrocartilagineo e sono ricoperti da una guaina fibrosa o retinacolo. I retinacoli degli estensori e dei flessori delle mani e dei piedi sono esempi di tali strutture.
- 2) Le *troclee di flessione* sono rinforzi anatomici delle guaine fibrose suddette, localizzati in posizioni in cui si trovano le curve lungo il decorso del tendine. Il loro compito è di mantenere il tendine in posizione.
- 3) Le *guaine sinoviali* sono i canali di accesso tra i tendini e le superfici ossee o le altre strutture anatomiche che possono causare attrito. Sotto uno strato fibroso, ci sono due foglietti sottili e sierosi, la lamina parietale e viscerale. Queste lamine formano un condotto chiuso, comprendente un liquido peritendineo lubrificante.
- 4) Nei tendini che non hanno una vera e propria guaina sinoviale può esservi un *foglietto peritendineo (paratenonio)* che riduce l'attrito. È composto di tessuto fibrillare lasso e funziona da manicotto elastico che consente il movimento libero del tendine rispetto ai tessuti circostanti.
- 5) Le *borse tendinee* costituiscono il quinto tipo di strutture extratendinee ed hanno un importante ruolo nella riduzione dell'attrito. Sono localizzate nei siti anatomici in cui la prominente ossea potrebbe altrimenti comprimere e logorare il tendine.

Guaina tendinea

Queste guaine sono localizzate nelle aree di curvature e nelle zone delle dita. La loro funzione principale è di minimizzare l'attrito tra il tendine e le strutture adiacenti. La guaina tendinea è costituita da due strati. Lo strato esterno è la guaina fibrosa e quello interno è la guaina sinoviale, costituita da due foglietti sierosi denominati parietale e viscerale. La guaina fibrosa è costituita da una rete di fibre collagene, con le fibrille e le fibre orientate in senso longitudinale, obliquo o circolare rispetto all'asse maggiore del tendine. La superficie interna dello strato fibroso è ricoperta da cellule sinoviali di rivestimento della lamina sinoviale parietale e la superficie tendinea è ricoperta dalle cellule di rivestimento della lamina viscerale. Lo spazio tra questi due foglietti contiene un sottile film liquido che ha una composizione simile a quella del liquido sinoviale di un'articolazione. Le cellule sinoviali di rivestimento sono ricoperte di sottili fibre collagene e mostrano un aspetto ondulato e protrusioni verso la cavità della guaina tendinea. Possono essere distinti due tipi di cellule sinoviali di rivestimento. Il primo tipo di cellule sinoviali sono cellule simil-macrofagi che costituiscono fino al 20-30% del rivestimento sinoviale. Queste cellule secernono acido ialuronico che serve da lubrificante opponendosi all'irritazione da attrito ed hanno funzioni fagocitiche. Il secondo tipo di cellule sinoviali ha caratteristiche fibroblastiche e costituisce il 70-80% della popolazione cellulare. Queste cellule si ritiene possano produrre liquido sinoviale ricco di acido ialuronico. Nel citoplasma di queste cellule, si possono trovare glicosaminoglicani ed altri proteoglicani. La principale funzione del liquido sinoviale è quella di migliorare la circolazione. Tuttavia può anche favorire la nutrizione tendinea. Lundborg ha suggerito che il liquido sinoviale costituisce un importante mezzo per il trasporto dei nutrienti ai tessuti tendinei. Il mesotenonio è tipico dei tendini della mano e del piede e possiede due funzioni ed è rivestito dalla guaina sinoviale bistratificata.



Le membrane del tendine di Achille. Le frecce evidenziano la fascia crurale.

Mesotenonio: paratenone ed epitenone

Solo alcune parti di pochi tendini delle mani e dei piedi effettivamente possiedono le guaine tendinee bistratificate suddette, cioè le vere e proprie guaine tendinee possono essere presenti solo nelle zone in cui un cambiamento di direzione ed aumento dell'attrito richiedono una lubrificazione molto efficiente. Invece, molti tendini sono circondati da tessuto connettivo denominato *paratenone*. Il sistema di fibrille collagene ditale struttura è ben definito. Le principali componenti del paratenone sono le fibrille collagene di tipo I e III, le fibrille elastiche e le cellule sinoviali che rivestono la superficie interna del paratenone. Il paratenone funziona da manicotto elastico e consente il movimento del tendine rispetto ai tessuti circostanti. Sotto il paratenone, l'intero tendine è circondato da una sottile guaina di tessuto connettivo denominata epitenone. Insieme il paratenone e l'epitenone talvolta sono definiti *peritendine*. Sulla sua superficie esterna, l'epitenone è contiguo al paratenone e sulla superficie interna è contiguo all'endotenone. All'interno del tendine, l'endotenone riveste ogni fibra tendinea e lega le fibre abituali, e nelle unità più grandi, lega tra loro i fasci di fibre. L'epitenone è una rete fibrillare relativamente densa di collagene con file dello spessore di 8-10 nm. Questa rete contiene fibrille longitudinali, oblique e trasversali e mostra una minima variazione nella densità o nell'orientamento fibrillare. In condizioni di riposo, parte delle fibre collagene presenta un'angolazione di circa 60° rispetto alle fibre tendinee. Questo angolo diminuisce a circa 30° se il tendine viene stirato. È stato ipotizzato che questo sistema di fibre sia un meccanismo di difesa contro la tensione eccessiva del tendine.

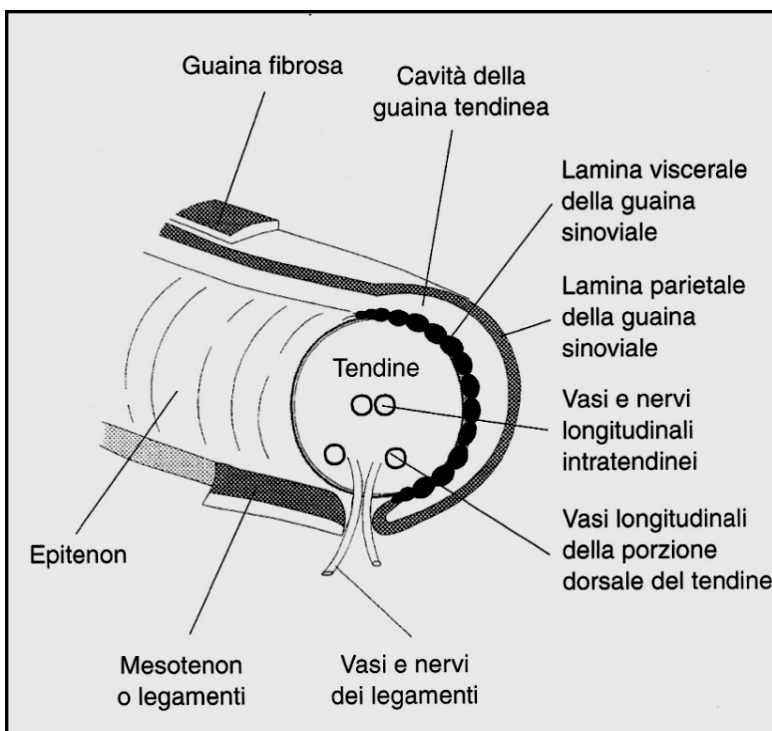


Figura soprastante: la struttura della guaina tendinea.

Endotenone

L'endotenone è una sottile rete di tessuto connettivo reticolare all'interno del tendine con una caratteristica di incrocio ben sviluppata delle fibre collagene. Le fibrille dell'endotenon rivestono le fibre paratendinee e le legano assieme. Un insieme di fasci tendine forma un fascio primario (subfascicolo) e gruppi di questi fasci formano i fasci secondari (fascicoli). Un gruppo di fasci secondari forma i fasci terziari che costituiscono il tendine. L'endotenone circonda i fasci primari, secondari e terziari. Per migliorare il legame, esiste un alto grado di idratazione delle componenti di proteoglicani tra l'endotenone e la superficie dei fascicoli tendinei. Insieme a questa importante funzione relative al legame, la rete dell'endotenone consente a gruppi di fibre di decorrere uno sull'altro e di trasportare i vasi sanguigni, i nervi ed i linfatici fino alle porzioni più profonde del tendine.

Orientamento delle fibre nei tendini umani

Il microscopio elettronico a trasmissione ed a scansione ha documentato che le fibrille collagene sono orientate in senso longitudinale oltre che trasversale ed orizzontale, con le fibrille longitudinali che si incrociano tra loro e formano spirali e intrecci. Questa complessa ultrastruttura dei tendini determina una buona capacità tampone contro le forze longitudinali, trasversali, orizzontali e rotazionali durante il movimento e l'attività soprattutto sportiva.

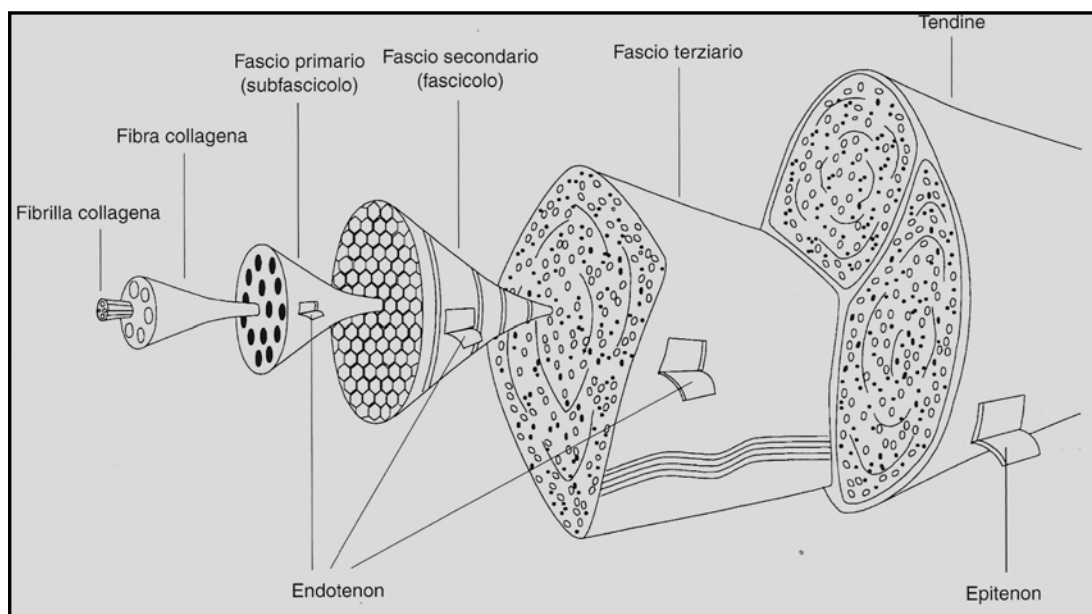


Figura soprastante. L'organizzazione gerarchica della struttura tendinea dalle fibrille collagene all' interno del tendine.

Architettura interna dei tendini

I tendini sono costituiti di collagene (prevalentemente di tipo I) ed elastina immersi in una matrice di proteoglicani ed acqua, con il collagene che rappresenta circa il 2% della massa secca del tendine. Questi prodotti vengono prodotti dai tenoblasti e dai tenociti (che sono fibroblasti e fibrociti allungati situati tra le fibre allungati tra le fibre collagene) e sono organizzati in uno schema gerarchico complesso in modo da formare il tendine vero e proprio. Le molecole di tropocollagene solubile formano legami crociati in modo da creare molecole di collagene insolubili che progressivamente si aggregano in unità definite e chiaramente visibili al microscopio elettronico denominate fibrille collagene.

Fibrille collagene, fasci di fibre e fascicoli. Un fascio di fibrille collagene, forma una fibra, che costituisce l'unità fondamentale di un tendine. Una fibra rappresenta la più piccola struttura di collagene che può essere evidenziata meccanicamente ed è allineata in direzione termino terminale in un tendine. Una sottile guaina di tessuto connettivo denominata endotenone riveste ciascuna fibra collagena e lega le fibre tra loro. Un fascio di fibre collagene forma un fascio primario (subfascicolo) ed un gruppo di fasci di fibre primarie forma un fascio secondario (fascicolo). Un gruppo di fascicoli secondari, a sua volta, forma un fascio terziario e quest'ultimo costituisce il tendine circondato dall'epitenone. Nei tendini umani, il diametro dei fasci terziari varia da 1 a 3 mm. Il diametro dei fasci secondari varia da 150 a 1000 μm . Il diametro di entrambi i tipi di fasci è direttamente proporzionale alle dimensioni macroscopiche del tendine: il diametro minore si trova nei tendini piccoli, come i flessori e gli estensori delle dita delle mani e dei piedi ed il diametro maggiore si trovano nei tendini grandi, come quello d'Achille, del tibiale anteriore e dell'estensore lungo dell'alluce. In sezione trasversa, il profilo dei fasci di fibre primarie o subfascicoli (15- 400 μm di diametro) generalmente è triangolare con angoli relativamente acuti. Generalmente un fascicolo possiede tre o quattro subfascicoli sebbene alcuni Autori abbiano riportato che i fascicoli tendinei possono avere fino a 10-12 sub-fascicoli. Sia i fascicoli che i fasci di fibre terziari mostrano una spiralizzazione lungo il decorso del tendine. La piegatura o la formazione di ondulazioni nelle fibre collagene è un fenomeno caratteristico all'interno di un fascicolo o tra fascicoli diversi. La piegatura è varia ed irregolare lungo il decorso delle fibre o tra esse e l'angolo tra le pieghe varia da 0 a 60°. La direzione delle pieghe nelle fibre o la fase dell'ondulazione può essere completamente invertita tra la superficie anteriore e posteriore dei fascicoli e dei subfascicoli. La rotazione dei subfascicoli mostra il diverso tipo di piegatura che si può verificare nel tendine.

Fibra collagena. Il numero delle fibre collagene in ogni fascio primario (sub-fascicolo) può variare notevolmente a seconda dei tendini ed è variabile anche il diametro delle fibre che oscilla da 5 a 30 μm nei tendini umani, il diametro delle fibre può arrivare a 300 μm . La concentrazione di collagene in ciascuna fibra è direttamente proporzionale

al diametro della fibra, che a sua volta dipende dal numero piuttosto che dalle dimensioni delle fibre che la costituiscono. Il diametro di una fibra collagene può variare del 30 - 50 μm lungo il suo decorso. Tra tendini diversi, lo spessore delle fibre variava notevolmente, con la differenza di spessore. Tuttavia, nel tendine d'Achille, questa differenza poteva essere più che doppia. Il diametro medio delle fibre nei tendini integri nei tendini del quadricepito era di 21.8 μm e nel tendine d'Achille era di 26.0 μm . In fase di riposo, le fibre e le fibrille collagene di un tendine mostrano una configurazione ondulatoria che può essere evidenziata chiaramente al microscopio elettronico a scansione. L'orientamento delle fibre è ben definito. Questa configurazione scompare se il tendine viene teso leggermente delle fibre collagene. Quando la tensione viene rilasciata, il tendine riassume la sua normale caratteristica ondulatoria. Al di sotto di un allungamento all'incirca del 4%, la curva tensione stiramento di un tendine è riproducibile con una sequenza di stiramenti, ma non appena viene superato tale limite la forma ondulatoria non riappare e le deformazioni successive non riproducono la forma originale. Se una tensione acuta causa un allungamento dell' 8% o oltre, è probabile che il tendine si possa rompere. Il decorso delle fibre collagene lungo un tendine non è solo parallelo. Al microscopio sono evidenziabili quattro tipi di fibre crociate. Per tutta la lunghezza dei tendini, il rapporto tra le fibre longitudinali e trasversali varia da 10:1 e 26:1. Inoltre, tutte queste fibre formano spirali.

Fibrille collagene. Una fibra collagene è costituita da un numero variabili di fibrille. Il diametro delle fibrille varia da 20 a 150nm. Nel tendine d'Achille umano, il diametro delle fibrille varia da 30 e 130 nm, mentre negli estensori delle dita della mani e dei piedi, il diametro varia tra 20 e 60 nm. Ricerche hanno evidenziato che lo spessore delle fibrille del tendine d'Achille sano nell'uomo varia tra 30 e 80 nm. L'ultrastruttura tridimensionale di una fibra tendinea è complessa. Nell'ambito di una fibra collagena, le fibrille sono orientate in direzione longitudinale oltre che trasversale ed orizzontale. Le fibrille longitudinali decorrono parallele e si incrociano anche fra loro per formare spirali. Alcune fibrille individuali e gruppi di fibrille formano lamine a spirale come evidenziato al microscopio elettronico.

Variazioni segmentali nell'architettura tendinea. Un tendine o più precisamente le fibre collagene con la loro grande forza meccanica ma scarsa elasticità, è destinato principalmente a sopportare carichi di tensione ed è meno capace di sopportare le forze elastiche e di compressione. Nei tessuti sottoposti prevalentemente a quest'ultimo tipo di forza, le fibre collagene e le cellule sono sostenute da una matrice ben idratata ricca di glicosaminoglicani. I tendini dei flessori sono sottoposti prevalentemente a forze di tensione, ma in alcuni aree sono sottoposti anche a forze di compressione. Per migliorare l'elasticità, i tendini dei flessori profondi possiedono regioni simil-fibrocartilaginee all'interno della guaina tendinea. Rispetto ad altre zone, queste regioni hanno un alto tasso di sintesi di glicosaminoglicani (GAG) ed una bassa frequenza della sintesi di collagene e di proteine non collagene. Ne consegue che le caratteristiche strutturali delle cellule tendinee, del collagene e della matrice sono notevolmente

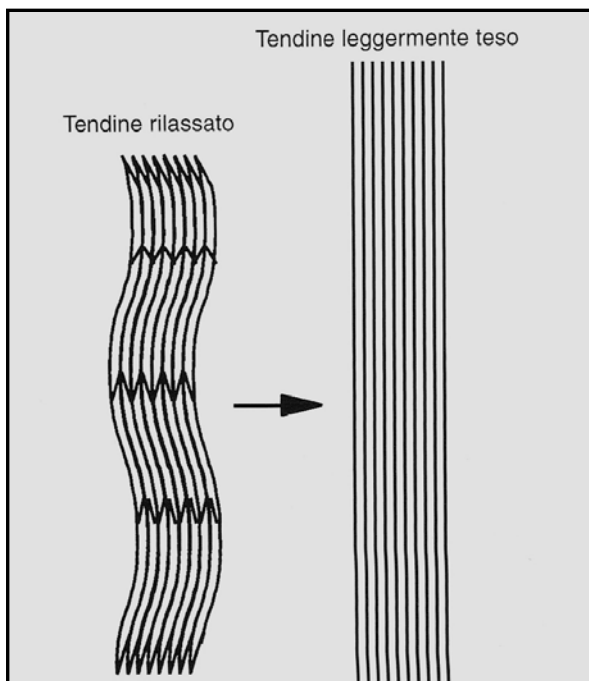
diverse nelle aree di tensione e della pressione con un ampio spettro di caratteristiche di transizione a livello della loro giunzione. Il rapporto fibre/matrice è all'incirca del 70% nella zona di transizione, mentre è solo di 40% nella zona di pressione. In quest'ultima zona, il diametro delle fibrille è minore e la quantità della matrice ricca di glicosaminoglicani è maggiore rispetto alla zona di tensione di tali tendini. Nella zona sottoposta a pressione, la quantità di GAG è pari al 3.5% del peso secco del tendine e comprende una grossa quantità di condroitinsolfato (65%), mentre nella zona sottoposta a tensione la quantità è pari allo 0.2% e comprende prevalentemente dermatan-solfato.

Importanza della struttura tridimensionale complessa di un tendine. La struttura interna tridimensionale delle fibre forma un sistema tampone contro le forze di varie direzioni e quindi evita il danno e la rottura delle fibre. L'alterazione delle forze fisiche che influenzano un tendine per aumento o riduzione del carico tensionale o compressivo determina una variazione marcata e prevedibile della composizione e della struttura tendinea. In generale, i segmenti tensionali possono avere una migliore capacità di risposta e di rigenerazione rispetto alle zone pressorie.

○ **Giunzione miotendinea**

La giunzione miotendinea (MTJ) è una regione anatomica altamente specializzata nell'unità muscolotendinea. In tale regione, la tensione generata dalle fibre muscolari è trasmessa dalle proteine contrattili intracellulari alle proteine del tessuto connettivo extracellulare (fibrille collagene) del tendine. Studi morfologici mostrano che a livello della MTJ le fibrille collagene si inseriscono in recessi profondi che si formano tra i processi digitiformi delle cellule muscolari. Questo tipo di ripiegamento della membrana basale delle terminazioni delle cellule muscolari aumenta notevolmente l'area di contatto tra le fibre muscolari e quelle collagene tendinee, di circa 10-20 volte. Ciò a sua volta può ridurre significativamente la forza applicata per unità di superficie della MTJ durante la contrazione muscolare. Secondo uno studio la struttura e la composizione macromolecolare della MTJ è abbastanza simile nelle fibre di tipo I e di tipo II. Le differenze sono prevalentemente quantitative. La superficie di contatto della giunzione è maggiore del 30-40% nelle fibre di tipo II, che vengono usate nei movimenti volontari rapidi, rispetto alle fibre di tipo I, che sono coinvolti nei movimenti più lenti e vengono usate nei movimenti più lenti e vengono usate nel sostegno prolungato della postura corporea. In tal modo, i movimenti più potenti creati dalle cellule muscolari di tipo II possono essere trasmessi attraverso la MTJ senza aumentare la forza applicata all'unità di superficie della giunzione. La maggiore superficie di contatto è ottenuta nelle cellule di tipo II per ulteriore suddivisione dei processi in subunità più piccole. I processi digitiformi delle cellule muscolari sono lunghi 1-8 μm , generalmente sono separati in maniera incompleta l'uno dall'altro e con perforazioni canaliformi nelle quali penetrano le fibrille collagene tendinee. In entrambi i tipi di fibre

muscolari, la lamina basale della MTJ è spessa circa il triplo rispetto a quello dei siti longitudinali delle cellule muscolari. La composizione macromolecolare della lamina basale della MTJ è simile nelle fibre muscolari di tipo I e II. La membrana basale dei processi miocellulari contiene proteoglicani e glicosaminoglicani. Sono presenti soprattutto eparan-solfato, condroitin-4-solfato e dermatan solfato. Inoltre è possibile evidenziare anche grandi quantità di fibronectina e laminina sulle terminazioni membranose delle cellule muscolari. La principale componente collagenosa della MTJ è il collagene di tipo I. Scarsa quantità di collagene di tipo III possono essere riscontrate esclusivamente sul sito muscolare della giunzione. Sul sito tendineo della giunzione, le fibrille collagene di tipo I sono costituite da una rete fibrillare densa. La matrice a livello della porzione tendinea è ricca di glicosaminoglicani e proteoglicani. È molto probabile che le varie proteine e GAG riscontrati a livello delle MTJ abbiano una funzione di collegamento per consentire la trasmissione delle forze tra la membrana delle cellule muscolari e le fibrille collagene tendinee. L'elevata concentrazione di questi polisaccaridi all'interfaccia miotendinea probabilmente aumenta le forze di adesione tra le due strutture e quindi può essere importante nel migliorare la capacità tampone elastica della MTJ contro un carico. In particolare, il condroitin e dermatan-solfato possono avere una funzione adesiva. Tuttavia, nonostante il ripiegamento della membrana e la specifica composizione macromolecolare, la MTJ è il punto più debole dell'unità muscolo-tendinea, che la rende sensibile a traumi di tensione. Quindi quest'area è molto importante dal punto di vista clinico ed è particolarmente interessante nell'ambito della patologia tendinea.



La configurazione ondulatoria delle fibre collagene di un tendine rilassato scompare quando il tendine viene leggermente teso e corrisponde al raddrizzamento delle fibre.

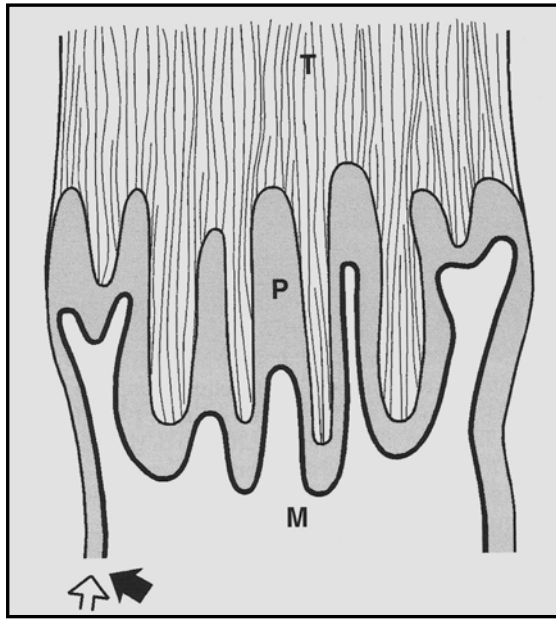


Figura schematica dell'ultrastruttura della giunzione miotendinea:

T = fibrille collagene tendinee;

M = cellule muscolari,

P = proiezioni della cellula muscolare;

Freccia nera = lamina densa della membrana muscolare basale;

Freccia chiara = lamina lucida della membrana basale muscolare.

○ Giunzione osteotendinea

La giunzione osteotendinea è una regione specializzata nell'unità muscolo-tendinea in cui il tendine si inserisce su un osso. Nella OTJ, il tendine viscoelastico trasmette la forza ad un osso rigido. La giunzione osteotendinea si può suddividere in 4 zone visibili al microscopio ottico:

1. tendine;
2. fibrocartilagine;
3. fibrocartilagine mineralizzata;
4. osso.

Zona tendinea. La porzione tendinea dell'OTJ è costituita da fasci densi di collagene contenenti tenoblasti allungati. Le fibre collagene hanno un diametro di 10-55 nm con fibrille di 25-100 di diametro. Le fibrille contengono materiale granulare e filamentoso. In alcune regioni, si evidenziano anche fibre elastiche. Verso lo stato fibrocartilagineo, la quantità della matrice aumenta. Tra le fibrille ed i fasci fibrillari, può essere evidenziata una grande quantità di GAG, soprattutto condroitin-solfato.

Fibrocartilagine. Esaminata al m.e., la zona di transizione tra il tessuto tendineo e la fibrocartilagine è graduale. Questa zona è più ispessita nei bambini rispetto agli adulti. Gradualmente le cellule perdono la loro forma allungata e diventano rotonde, iniziando a somigliare ai condrociti. Sono disposte a coppie o in file circondate da uno spazio lacunare della matrice extracellulare. Intorno ai condrociti, possono essere evidenziate fibrille di collagene tendinee di 10-30 nm.

Fibrocartilagine mineralizzata. La fibrocartilagine è separata dalla fibrocartilagine mineralizzata da un margine distinto denominato “linea di cemento” o “blu”. L’ampiezza della fibrocartilagine mineralizzata è di 100-300nm. Le cellule in questa regione sono simili ai condrociti della fibrocartilagine. Ciò significa che molte di queste cellule restano vive, sebbene siano circondate da tessuto mineralizzato. Contemporaneamente, la quantità di sostanza di fondo ricca di condroitin-solfato aumenta. Le fibre collagene del tendine raggiungono questa regione e possono essere distinte due zone di diversa calcificazione delle fibre collagene. La mineralizzazione si verifica sia come deposito granulare fine sulle fibre, sia sotto forma di cristalli di idrossipatite.

Ossso. Il margine tra la fibrocartilagine mineralizzata e l’osso è variabile all’esame al m.o. ed elettronico e le fibre collagene di queste due zone sono indistinguibili. Il tessuto osseo non mostra caratteristiche particolari che lo distinguono dall’osso normale. A seconda delle direzioni delle forze trasmesse, l’architettura delle fibre collagene dell’OTJ varia notevolmente. Nella fibrocartilagine e nella sua controparte mineralizzata, le fibre si incrociano intorno ai condrociti. Insieme a un’elevata concentrazione di glicosaminoglicani con funzione adesiva nell’area, tale disposizione probabilmente può avere un’importante ruolo di ammortizzatore nel migliorare la capacità tampone elastica della OTJ contro il carico. La fibrocartilagine consente anche la crescita ossea nel punto d’inserzione man mano che l’organismo cresce. In caso di funzionamento ottimale, sia la buona rigidità (potenza tensionale) che l’adeguata elasticità (resistenza alla deformazione ed alla compressione) di questo tipo di OTJ dovrebbero proteggere la struttura. Alcuni ricercatori hanno suggerito che le fibrille tendinee appartenenti alla OTJ hanno la stessa struttura tridimensionale delle fibrille tendinee vere e proprie e sono quindi in grado di soddisfare i requisiti funzionali. In questo modello, l’aspetto ondulatorio delle fibrille scompare durante lo stiramento longitudinale e ricompare quando la tensione viene rilasciata.

○ **Ossa sesamoidi**

I sesamoidi sono ossa isolate situate nei tendini, le cui superfici articolari sono rivestite di cartilagine ialina. I sesamoidi si trovano nei punti in cui si verificano variazioni di direzione nella zona di tensione di un tendine ed aumentano le caratteristiche meccaniche dell’unità miotendinea oltre a ridurre l’attrito in tale area. I sesamoidi hanno localizzazioni multiple a livello del piede e della caviglia. I più noti si trovano a livello dell’articolazione metatarsofalangea, mentre sono reperibili più raramente a livello della prima articolazione interfalangea, dei tendini del tibiale posteriore ed anteriore, del peroniero lungo, delle ossa che circondano l’articolazione metatarsofalangea del quinto dito e sulla superficie plantare dei muscoli del metatarso.

▪ **Fibre collagene ed altre sostanze intercellulari**

La matrice tendinea extracellulare è costituita da:

- a. fibre di collagene,
- b. elastina,
- c. sostanza di fondo,
- d. componenti inorganiche.

Il collagene costituisce circa il 90% delle proteine totali, o il 65-75% della massa secca. A sua volta, l'elastina costituisce solo circa il 2% della massa secca di un tendine. La stabilità meccanica del collagene tendineo è il fattore più importante responsabile della forza meccanica di un tendine. La funzione delle fibre elastiche è di poter contribuire al recupero della configurazione ondulatoria delle fibre collagene dopo uno stiramento tendineo. La sostanza di fondo, che circonda il collagene, è costituito da proteoglicani (GAG) e glicoproteine strutturali. È un gel idrofilo e può avere una consistenza variabile a seconda della percentuale relativa di acidi ialuronico e di condroitinsolfato in esse presenti. La capacità idrofila di queste macromolecole è considerevole e migliora l'elasticità di un tendine contro le forze deformanti e compressive. Sono anche importanti per la stabilizzazione dell'intero sistema collagenoso del tessuto connettivo per il mantenimento dell'omeostasi ionica e della fibrocollagenasi collagena.

a) Fibre collagene

Tutte le molecole sono formate da lunghi bastoncini rigidi costituiti da una tripla elica formata da tre catene polipeptidiche denominate catene alfa. Sono stati scoperti 13 diversi tipi di molecole collagene nei mammiferi, che possono essere divisi in collagene fibrillare e non fibrillare.

Tipi di collagene. I 13 tipi di collagene contengono o un solo tipo di catene alfa o di catene alfa diverse. I tipi tessutali I, II, III e IV sono i più abbondanti e la loro percentuale relativa di ciascun tipo di collagene nei vari tessuti è caratteristica e specifica. Nei tendini, nei legamenti, nell'osso e nel tessuto connettivo intramuscolare, predomina il collagene di tipo I, ma possono essere riscontrate anche quantità di altri tipi collagene. Il collagene di tipo I è spesso organizzato a fibre parallele e nei tendini forma fibre organizzate anche in senso orizzontale e trasversale a formare spirali e lamine. Il collagene di tipo I è idoneo alla trasmissione della forza. A livello della giunzione miotendinea, è associato al collagene di tipo I, III e IV. Gli altri tipi di collagene costituiscono solo una minima parte della famiglia, sebbene il loro ruolo possa essere più importante rispetto a quanto sia finora noto.

Collagene di tipo I. Le sue catene hanno la particolare capacità di formare molecole tropocollagene o microfibrille, oltre alle unità più grandi delle fibrille e delle fibre. La molecola di collagene è lunga circa 300 nm ed è larga 1-2 nm. Le catene alfa sono

circondato da un sottile strato di proteoglicani e glicosaminoglicani. Diverse molecole di tropocollagene o microfibrille costituiscono la fibrilla collagena. Ciascuna molecola di collagene si sovrappone alla successiva per un quarto della sua lunghezza producendo il caratteristico aspetto a bande di 64-68 nm o a striatura di una fibrilla collagena nativa. Il diametro di una fibrilla collagena generalmente rientra tra 20 e 150nm. Nell'ambito di una fibrilla, le microfibrille sono circondate da proteoglicani che rivestono le catene alfa. Nell'ambito di una fibra, le fibrille sono circondate da proteoglicani e GAG.

Composizione chimica del collagene di tipo I. Ciascuno tipo di collagene è una combinazione particolare di tre catene alfa ed ognuna delle diverse catene alfa è un particolare prodotto con una specifica catena aminoacidica. Ogni catena alfa è costituita da una tripletta ripetitiva di glicina e di altri due aminoacidi. Il residuo glicinico ogni tre posizioni rende possibile la spiralizzazione delle catene alfa. Le posizioni X ed Y sono occupati dagli aminoacidi prolina e 4-idrossiprolina che promuovono la stabilità della triplice elica. La struttura formata dalle triplette ripetitive delle catene alfa è un requisito assoluto alla formazione della tripla elica nella molecola di collagene. La prolina e l'idrossiprolina costituiscono il 20-25% di tutti i residui aminoacidici del collagene di tipo I. La struttura ad elica delle molecole di collagene rende la molecola di tropocollagene o la microfibrilla un'unità diritta relativamente rigida che è essenziale all'organizzazione delle microfibrille nelle fibrille collagene. Inoltre, la presenza dell'idrossilisina è essenziale per la formazione dei legami crociati intermolecolari, che a loro volta, sono responsabili dell'elevata forza elastica delle fibre collagene. La biosintesi del collagene implica la trascrizione e la traduzione dei geni, analogamente alle altre proteine. La formazione della struttura della tripla elica è un fattore cruciale per la secrezione normale. Negli animali adulti, l'emivita del collagene è assimilabile all'intera durata di vita. Gli enzimi collagenasi determinano solo una rottura o un taglio per ciascuna catena alfa nella molecola di collagene a tripla elica. Questo taglio singolo determina la despiralizzazione o la denaturazione della molecola. Il collagene denaturato è quindi sensibile alla degradazione da parte degli altri enzimi proteolitici. Queste altre proteasi sono la catepsina G, gli enzimi simil-chimotripsina e l'elastasi. Tale processo degradativo-bifasico si verifica con tutte le collagenasi che sono prodotte da diversi tessuti e cellule, quali le cellule sinoviali, i leucociti ed i macrofagi. Probabilmente sono secrete sotto forma di precursori inattivi che successivamente vengono inattivati nel tessuto bersaglio. Tuttavia, possono anche essere complessi ad inibizione enzimatica. Entrambi i meccanismi possono essere operativi nello stesso tessuto connettivo a seconda delle circostanze. Inoltre, gli ormoni o le altre sostanze possono avere un ruolo operativo finora indefinito nel processo di degradazione del collagene.