

POLITECNICO DI TORINO

Corso di laurea magistrale in ingegneria biomedica
orientamento biomeccanico



Tesi di laurea magistrale

Progettazione di un tutore chirurgico patient specific per la realizzazione dei tunnel ossei nella ricostruzione del legamento crociato anteriore

Relatrice

Prof.ssa Cecilia Surace

Correlatori

Ing. Oliver Grimaldo Ruiz

Ing. Mariana Rodríguez Reinoso

Dott. Filippo Surace

Candidato

Francesco Incani

MARZO 2021

ABSTRACT

The anterior cruciate ligament (ACL) tears remain one of the most common orthopedic injuries worldwide, especially among young people. Despite the variety of specific techniques, the reconstruction (ACL-R) is the major accepted procedure used to restore stability and range of motion (ROM) of the Knee Joint. However, clinical evidence reported in the literature has shown unsatisfactory long-term outcomes. In the United States, e.g., there is a percentage of failure of about 10-20%. Although several factors may influence the outcome, the most debated is related to the surgical technique. The most frequent error reported during revision cases is the mispositioning of the bone tunnels, causing long-term functional consequences.

The most recent surgical techniques for bone tunneling have focused on an anatomical ACL with the goal of a functional restoration that mimics the position of the native ligament. This study is centered to design a patient-specific surgical brace for accurate positioning of the bone tunnels using the All-Inside (AI) portals. The brace was based on a digital imaging and communications in medicine (DICOM) dataset of an unknown patient with an injured ACL obtained from a magnetic resonance (MRI).

The dataset was imported into the Mimics® software where manual segmentation and 3D model reconstruction were performed. The post-processing phase was completed in the 3-Matic®. Before the design, the Knee Joint anatomical model was oriented according to the anatomical planes and ACL prints were identified. Subsequently, the knee joint was positioned at 90° as projected under the conditions of a standard ACL reconstruction. The surgical brace consisting of three constitutive components (one lower, one femoral, and one tibial), enabling and holding the Knee Joint in the correct position, guaranteeing a precise execution of the procedure. Through the brace, two arthroscopic accesses and two specific orientations were located enabling the creation of bone tunnels. Thereby, the correct

orientation of the drill through the tunnels is guided to the entries of the tibial and femoral parts of the brace. This study aims to demonstrate a new surgical approach: the use of the brace as a guide enables to reduce preoperative evaluation times and to create tibial and femoral tunnels with greater precision.

Indice

Introduzione	1
Anatomia del ginocchio	3
1.1 Menischi	5
1.2 Legamenti del ginocchio.....	7
1.4 Anatomia attraverso le immagini di risonanza magnetica (MRI).....	9
Il legamento crociato anteriore	13
2.1 Anatomia del legamento crociato anteriore	13
2.2 Biomeccanica del legamento crociato anteriore	14
2.3 Epidemiologia di lesione del legamento crociato anteriore	16
2.4 Cause di rottura del legamento crociato anteriore.....	19
2.5 Diagnosi	21
2.6 Trattamento del legamento crociato anteriore lesionato	27
Ricostruzione del legamento crociato anteriore	29
3.1 Graft o Innesti.....	29
3.2 Tecniche di ricostruzione.....	38
3.3 Sistemi di fissazione.....	44
3.4 Tensionamento.....	49
3.5 Fallimento della ricostruzione	52
Ricostruzione del modello 3D del ginocchio	55
4.1 Segmentazione	55
4.2 Post Processing.....	71
4.3 Orientamento del ginocchio.....	74
4.4 Flessione del modello a 90°	78

Progettazione di un tutore come guida chirurgica	84
5.1 Visualizzazione delle impronte tibiale e femorale del LCA nativo	89
5.2 Accessi chirurgici per i tunnel tibiale e femorale	93
5.3 Simulazione della stampa 3D	98
5.4 Analisi agli elementi finiti	101
5.5 Confronto operatorio	111
Conclusioni	113
Bibliografia e Sitografia	115

Elenco delle figure

FIGURA 1 IL GINOCCHIO.	4
FIGURA 2 (A) IL GINOCCHIO COME ARTICOLAZIONE A CERNIERA	4
FIGURA 3 MENISCHI.....	5
FIGURA 4 UNA DISSEZIONE ANATOMICA DEL GINOCCHIO	6
FIGURA 5 LEGAMENTI DEL GINOCCHIO (VISTA CORONALE).....	8
FIGURA 6 LEGAMENTO O TENDINE PATELLARE.....	9
FIGURA 7 IMMAGINE MR ACQUISITA SUL PIANO SAGITTALE.....	10
FIGURA 8 IMMAGINE MR ACQUISITA SUL PIANO CORONALE	11
FIGURA 9 IMMAGINE MR ACQUISITA SUL PIANO ASSIALE	11
FIGURA 10 IMMAGINE MR ACQUISITA SUL PIANO ASSIALE	12
FIGURA 11 IL LEGAMENTO CROCIATO ANTERIORE (VISTA FRONTALE).....	14
FIGURA 12 RAFFIGURAZIONE DEL LCA CON IL GINOCCHIO IN ESTENSIONE E FLESSIONE	15
FIGURA 13 INCIDENZA DI RICOSTRUZIONE IN BASE ALL'ETÀ	18
FIGURA 14 DIFFERENZE NEL SALTO IN BASE AL SESSO	18
FIGURA 15 MOVIMENTO "PIANTA E PERNO".....	20
FIGURA 16 LESIONE DEL LEGAMENTO CROCIATO ANTERIORE	21
FIGURA 17 TEST DEL CASSETTO ANTERIORE.....	22
FIGURA 18 TEST DI LACHMAN	23
FIGURA 19 PIVOT SHIFT TEST.....	23
FIGURA 20 JERK TEST	24
FIGURA 21 RADIOGRAFIA DI UN GINOCCHIO CON LESIONE AL LCA	25
FIGURA 22 RISONANZA MAGNETICA SU UN GINOCCHIO CON LCA LESIONATO	26
FIGURA 23 ECOGRAFIA DI UN GINOCCHIO	26
FIGURA 24 TENDINE ROTULEO AUTOLOGO.....	31
FIGURA 25 TENDINE GRACILE E SEMITENDINOSO.....	32

FIGURA 26 TENDINE QUADRICIPITALE	33
FIGURA 27 TENSORE DELLA FASCIA LATA	34
FIGURA 28 GRAFT SINTETICO IN GORE-TEX	34
FIGURA 29 LARS (LIGAMENT ADVANCED REINFORCEMENT SYSTEM).....	35
FIGURA 30 RICOSTRUZIONE A SINGOLO FASCIO E DOPPIO FASCIO	38
FIGURA 31 TUNNEL ESEGUITO CON TECNICA TRANSTIBIALE	41
FIGURA 32 TUNNEL ESEGUITO CON TECNICA ANTERO-MEDIALE.....	42
FIGURA 33 FLIPCUTTER® III DRILL.....	43
FIGURA 34 VITI AD INTERFERENZA	45
FIGURA 35 SISTEMA RIGIDFIX®.....	46
FIGURA 36 ENDOBUTTON®	47
FIGURA 37 SISTEMA TRANSFIX®.....	48
FIGURA 38 CAMBRE.....	49
FIGURA 39 APPLICAZIONE DI UNA TENSIONE ALL'INNESTO.....	50
FIGURA 40 VISTA CORONALE DELLA MRI	56
FIGURA 41 VISTA ASSIALE DELLA MRI	56
FIGURA 42 VISTA SAGITTALE DELLA MRI.....	57
FIGURA 43 MASCHERA RELATIVA AL FEMORE NELLE TRE VISTE	57
FIGURA 44 RICOSTRUZIONE 3D DEL FEMORE	58
FIGURA 45 MASCHERA RELATIVA ALLA TIBIA NELLE TRE VISTE	59
FIGURA 46 RICOSTRUZIONE 3D DELLA TIBIA	59
FIGURA 47 MASCHERA RELATIVA AL PERONE NELLE TRE VISTE	60
FIGURA 48 RICOSTRUZIONE 3D DEL PERONE.....	60
FIGURA 49 MASCHERA RELATIVA ALLA ROTULA NELLE TRE VISTE	61
FIGURA 50 RICOSTRUZIONE 3D DELLA ROTULA	61
FIGURA 51 MASCHERE RELATIVE AI MENISCHI NELLA VISTA ASSIALE.....	62
FIGURA 52 RICOSTRUZIONE 3D DEI MENISCHI.....	62
FIGURA 53 MASCHERA RELATIVA AL LEGAMENTO COLLATERALE LATERALE.....	63
FIGURA 54 RICOSTRUZIONE 3D DEL LEGAMENTO COLLATERALE LATERALE	63
FIGURA 55 MASCHERA RELATIVA AL LEGAMENTO COLLATERALE MEDIALE.....	64
FIGURA 56 RICOSTRUZIONE 3D DEL LEGAMENTO COLLATERALE MEDIALE	64
FIGURA 57 MASCHERA RELATIVA AL LEGAMENTO CROCIATO POSTERIORE.....	65
FIGURA 58 RICOSTRUZIONE 3D DEL LEGAMENTO CROCIATO POSTERIORE.....	65

FIGURA 59 MASCHERA RELATIVA AL LEGAMENTO ROTULEO NELLE TRE VISTE.....	66
FIGURA 60 RICOSTRUZIONE 3D DEL LEGAMENTO ROTULEO	66
FIGURA 61 MASCHERA RELATIVA ALLA CARTILAGINE FEMORALE NELLE TRE VISTE.....	67
FIGURA 62 RICOSTRUZIONE 3D DELLA CARTILAGINE FEMORALE.....	67
FIGURA 63 MASCHERA RELATIVA ALLA CARTILAGINE TIBIALE NELLE TRE VISTE	68
FIGURA 64 RICOSTRUZIONE 3D DELLA CARTILAGINE TIBIALE	68
FIGURA 65 MASCHERA RELATIVA AL TESSUTO MOLLE NELLE TRE VISTE.....	69
FIGURA 66 RICOSTRUZIONE 3D DEL TESSUTO MOLLE.....	69
FIGURA 67 MODELLO 3D OTTENUTO CON LA SEGMENTAZIONE.....	71
FIGURA 68 MODELLO 3D DEL GINOCCHIO DOPO LA FASE DI POST PROCESSING.....	72
FIGURA 69 MODELLO 3D DEL GINOCCHIO DOPO LA FASE DI POST PROCESSING.....	73
FIGURA 70 MODELLO 3D DEL TESSUTO MOLLE DOPO LA FASE DI PP.....	74
FIGURA 71 ORIENTAMENTO ANATOMICO DEL GINOCCHIO.....	75
FIGURA 72 ORIENTAMENTO NORMALE DELL'ARTO INFERIORE	75
FIGURA 73 ANGOLI DEL GINOCCHIO SUL PIANO FRONTALE.....	76
FIGURA 74 ANGOLI DEL GINOCCHIO SUL PIANO SAGITTALE	77
FIGURA 75 MOTO DI ROTO-TRASLAZIONE DEL GINOCCHIO SUL PIANO SAGITTALE.....	79
FIGURA 76 FLESSIONE DEL MODELLO SUL PIANO SAGITTALE REALIZZATA SU 3-MATIC	79
FIGURA 77 ROTAZIONE DEL MODELLO LUNGO IL PIANO DEI CONDILI.....	80
FIGURA 78 SUPERFICIE DUPLICATA NELLE VARIE ANGOLAZIONI	81
FIGURA 79 ESTRUSIONI DELLE ESTREMITÀ FEMORALE E TIBIALE.....	82
FIGURA 80 MODELLO FINALE DEL GINOCCHIO A 90°	82
FIGURA 81 PARTE INFERIORE DLE TUTORE.....	85
FIGURA 82 PARTE FEMORALE DEL TUTORE.....	85
FIGURA 83 PARTE TIBIALE DEL TUTORE.....	86
FIGURA 84 COMPONENTE MASCHIO E FEMMINA SISTEMA DI FISSAGGIO DEL TUTORE	87
FIGURA 85 SISTEMA DI FISSAGGIO IN CHIUSURA.....	87
FIGURA 86 ELEMENTO DI SUPPORTO AL SISTEMA DI FISSAGGIO.....	88
FIGURA 87 TUTORE CHIRURGICO COMPLETO DEI SISTEMI DI FISSAGGIO	88
FIGURA 88 POSIZIONE TEORICA DELLE INSERZIONI DEL LCA.....	89
FIGURA 89 ESEMPIO DI UN'IMPRONTA TIBIALE DEL LCA.....	90
FIGURA 90 IMPRONTA TIBIALE NELLA VISTA SAGITTALE DELLA MRI	91
FIGURA 91 IMPRONTA TIBIALE NELLE VISTE CORONALE E ASSIALE.....	91

FIGURA 92 GRIGLIA PARALLELA ALL'ASSE DEL LCA	92
FIGURA 93 IMPRONTA FEMORALE NELLE TRE VISTE DELLA RISONANZA MAGNETICA	92
FIGURA 94 VISUALIZZAZIONE DELLE IMPRONTE FEMORALE E TIBIALE	93
FIGURA 95 ORIENTAMENTO DI 25° SUL PIANO SAGITTALE	94
FIGURA 96 ORIENTAMENTO DI 20° SUL PIANO FRONTALE.....	95
FIGURA 97 ACCESSO TIBIALE PER LA FRESA CHIRURGICA	95
FIGURA 98 ORIENTAMENTO DELL'ACCESSO FEMORALE DI 40° SUL PIANO FRONTALE	96
FIGURA 99 ORIENTAMENTO DELL'ACCESSO FEMORALE DI 45° SUL PIANO SAGITTALE.....	97
FIGURA 100 ACCESSO TIBIALE PER LA FRESA CHIRURGICA	97
FIGURA 101 SIMULAZIONE DI STAMPA DEL COMPONENTE FEMORALE	99
FIGURA 102 SIMULAZIONE DI STAMPA DEL COMPONENTE TIBIALE.....	99
FIGURA 103 SIMULAZIONE DI STAMPA DEL COMPONENTE INFERIORE DEL TUTORE	100
FIGURA 104 CONFIGURAZIONE DELLA GAMBA DURANTE LA RICOSTRUZIONE DEL LCA	101
FIGURA 105 COMPONENTE INFERIORE DEL TUTORE CHIRURGICO PER L'ANALISI FE.....	102
FIGURA 106 VINCOLI CINEMATICI.....	102
FIGURA 107 APPLICAZIONE DELLA COMPONENTE LUNGO L'ASSE Y DELLA FORZA PESO	103
FIGURA 108 MESH CON ELEMENTI DI DIMENSIONI DI 16 MM	104
FIGURA 109 MESH CON ELEMENTI DI DIMENSIONI DI 8 MM	104
FIGURA 110 MESH CON ELEMENTI DI DIMENSIONI DI 4 MM	105
FIGURA 111 MESH CON ELEMENTI DI DIMENSIONI DI 2 MM	105
FIGURA 112 MESH CON ELEMENTI DI DIMENSIONI DI 1.8 MM	106
FIGURA 113 MESH CON ELEMENTI DI DIMENSIONI DI 1.6 MM	106
FIGURA 114 MESH CON ELEMENTI DI DIMENSIONI DI 1.4 MM	107
FIGURA 115 MESH CON ELEMENTI DI DIMENSIONI DI 1.2 MM	107
FIGURA 116 MESH CON ELEMENTI DI DIMENSIONI DI 1 MM	108
FIGURA 117 GRAFICO DELL'ANALISI DELLA CONVERGENZA	108

Elenco delle tabelle

TABELLA 1 DATI SULL'INCIDENZA DELLA ROTTURA DEL LCA.....	17
TABELLA 2 INNESTI UTILIZZATI NELLA RICOSTRUZIONE DEL LCA.....	37
TABELLA 3 SOGLIE DI THRESHOLD DELLE STRUTTURE ANATOMICHE.....	70
TABELLA 4 ANGOLI MISURATI E INTERVALLI STANDARD RICAVATI DALLA LETTERATURA.....	78
TABELLA 5 SPECIFICHE TECNICHE DELLA RESINA GREY.....	98
TABELLA 6 VOLUME RELATIVO AI COMPONENTI DEL TUTORE CHIRURGICO.....	100
TABELLA 7 ERRORE % RELATIVO ALLE DIVERSE MESH.....	109
TABELLA 8 TENSIONE EQUIVALENTE DI VON MISES.....	109
TABELLA 9 DEFORMAZIONE TOTALE.....	110
TABELLA 10 DEFORMAZIONE LUNGO L'ASSE Y.....	110

Introduzione

L'intervento di ricostruzione del LCA permette il recupero della stabilità dell'articolazione del ginocchio con un grado di movimento quasi equivalente.

La ricostruzione, comunque, va incontro a fallimento nel 10-20% circa dei casi. Diversi studi hanno dimostrato, infatti, risultati a lungo termine insoddisfacenti nella ricostruzione, con l'insorgenza di un'elevata instabilità. La causa principale è legata alla tecnica chirurgica: l'errore più frequente è nel mal posizionamento dei tunnel ossei, che determina un'usura precoce dell'innesto.

Le tecniche chirurgiche più recenti per la realizzazione dei tunnel si sono focalizzate su una ricostruzione anatomica del LCA, in modo da ottenere un ripristino funzionale più simile al legamento nativo. L'obiettivo di questo studio è, dunque, progettare una guida chirurgica specifica per il paziente, basata su una risonanza magnetica del ginocchio, per un posizionamento accurato dei tunnel ossei sull'impronta femorale e tibiale del LCA nativo.

Sono state acquisite delle immagini DICOM di una risonanza magnetica del ginocchio di un paziente con LCA lesionato. Queste immagini, sulle viste assiale, coronale e sagittale sono state poi importate nel software Mimics®. Una volta terminata la segmentazione e realizzato il modello 3D si è passati alla fase di post processing nel software 3-Matic®.

In seguito, il modello 3D del ginocchio è stato orientato a 90° ponendosi nelle condizioni di un intervento standard di ricostruzione del legamento crociato anteriore. È stata progettata, dunque, la guida chirurgica: si tratta di un tutore costituito da tre

componenti (una inferiore, una femorale e una tibiale) che, tenendo il ginocchio nella giusta posizione, mediante due accessi, permette la realizzazione dei tunnel ossei. In questo modo, individuate le impronte native del legamento nativo e realizzati gli accessi con il corretto orientamento relativo ad esse, la fresa viene guidata dall'ingresso della parte tibiale e della parte femorale del tutore.

Questo studio si propone, quindi, di dimostrare un nuovo approccio chirurgico: l'uso del tutore come guida permette di ridurre i tempi di valutazione preoperatoria e la realizzazione dei tunnel tibiale e femorale con maggiore precisione.

Capitolo 1

Anatomia del ginocchio

L'articolazione del ginocchio è una delle più grandi e complesse del corpo umano. [1] Essa è formata da un apparato capsulo-legamentoso con formazioni tendinee e da una componente ossea. La capsula legamentosa contiene un fluido, chiamato sinoviale, che lubrifica l'articolazione diminuendo l'attrito. Per questo motivo il ginocchio può essere definito come un giunto sinoviale. [2] La parte ossea, invece, comprende:

- Il femore distale con i due condili, separati dalla gola intercondiloidea;
- La tibia prossimale con i suoi piatti tibiali, interno ed esterno;
- la rotula (o patella), posta anteriormente. [3]

Il ginocchio, un'articolazione a cerniera a sei gradi di libertà (Fig.2), è principalmente composto da tre comparti articolari: femoro-rotuleo, femoro-tibiale mediale e femoro-tibiale laterale. [4]

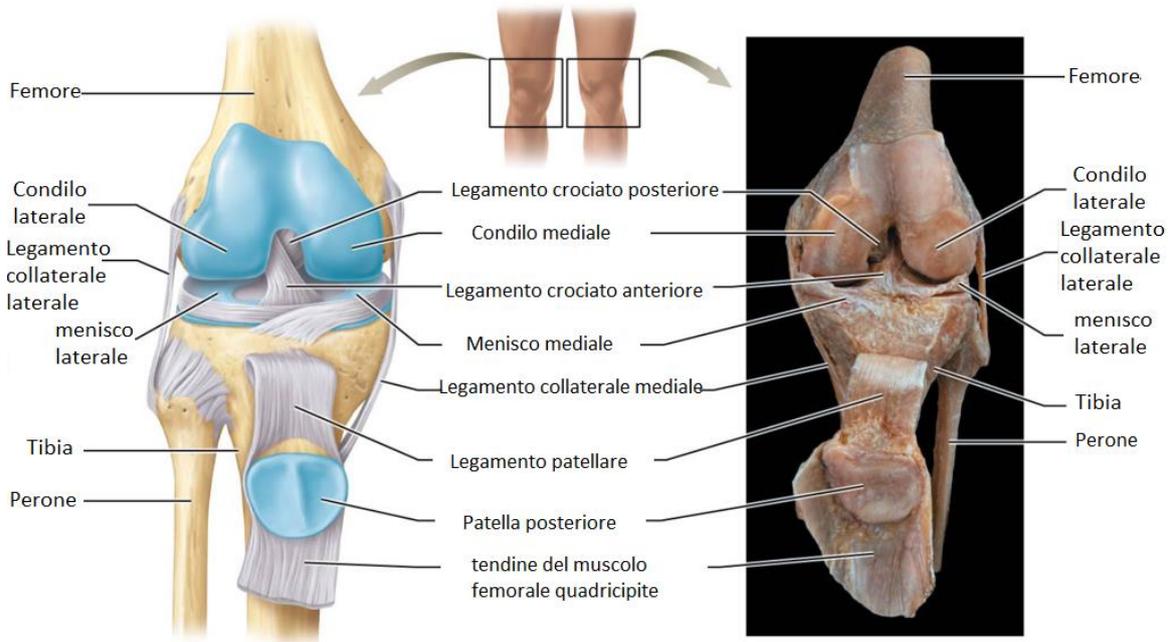


Figura 1 (a) vista anteriore, ginocchio destro (b) foto da cadavere, vista anteriore, ginocchio sinistro.

Le superfici articolari permettono una grande libertà nei movimenti mentre l'apparato legamentoso limita alla sola flessione-estensione. [5] A livello del ginocchio si verifica, poi, una trasmissione del peso corporeo alla gamba e perciò questa articolazione detiene un importante compito statico.

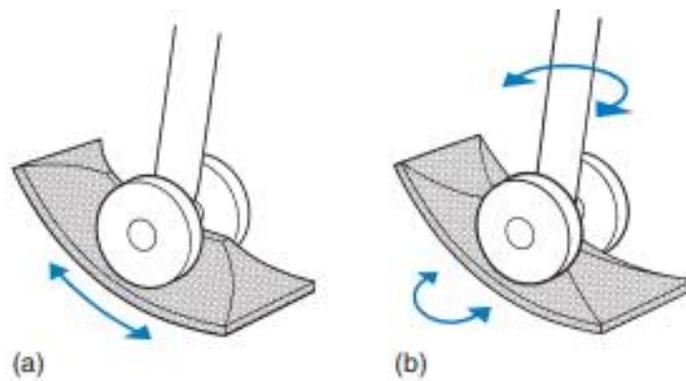


Figura 2 (a) Il ginocchio come articolazione a cerniera: i condili femorali ("ruote") in relazione alle superfici tibiale e rotulea ("binari"). (b) Appiattendosi l'estremità anteriore e posteriore del "binario", diventano possibili movimenti rotatori; le spine intercondiloidee fungono da perno centrale. [6]

Nell'articolazione, come già accennato, partecipa la parte inferiore del femore, in particolare la superficie patellare anteriore, foggata a troclea, e le superfici articolari dei condili. La tibia prossimale oppone ai condili femorali le due cavità glenoidee, situate sui piatti tibiali interno ed esterno. La superficie delle cavità glenoidee è ovoidale, all'interno di un'area non articolare, rugosa, che si innalza centralmente a formare la così detta spina intercondiloidea e si allarga posteriormente e anteriormente nelle rispettive fosse intercondiloidee. La patella prende parte all'articolazione con la sua superficie posteriore: la troclea femorale. [5] Il perone, invece, non partecipa all'articolazione del ginocchio; ha un piccolo giunto che lo collega al lato della tibia e normalmente si muove molto poco. [7] [8]

1.1 Menischi

I menischi sono piastre fibrocartilaginee a forma di mezzaluna che si trovano tra le superfici articolari del femore e della tibia. [9]

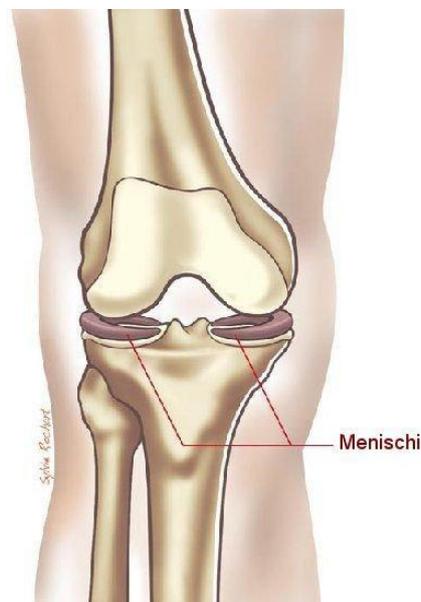


Figura 3 Menischi [10]

I menischi permettono di [11]:

- Assorbire gli urti.

- Trasmettere il peso corporeo sui piatti tibiali: aumenta l'ampiezza della superficie su cui viene trasmesso il carico, diminuendo l'usura dell'articolazione.
- Diffondere il liquido sinoviale nel ginocchio diminuendo l'attrito.
- Migliorare la congruenza tra la Tibia e il Femore.
- Limitare la rotazione.

I menischi sono divisi come segue [9]:

1. Menisco mediale: una piastra fibrocartilaginea a forma di C, quasi semicircolare, sopra la superficie del piatto tibiale mediale. Il suo corno anteriore si inserisce sulla zona intercondiloidea anteriore della tibia e si fonde con il legamento crociato anteriore. Il suo corno posteriore è inserito sull'area intercondiloidea posteriore della tibia, tra le inserzioni del menisco laterale e il legamento crociato posteriore.
2. Menisco laterale: una piastra fibrocartilaginea quasi circolare al di sopra della superficie del piatto tibiale laterale. Il suo corno anteriore si inserisce nell'area intercondiloidea anteriore della tibia e si unisce parzialmente con il legamento crociato anteriore. Allo stesso modo, il corno posteriore si inserisce sull'area intercondiloidea posteriore e al corno posteriore del menisco mediale.



Figura 4 una dissezione anatomica della superficie articolare tibiale prossimale (vista assiale, femore rimosso). 1 menisco mediale; 2 menisco laterale; 3 attacco tibiale del legamento crociato anteriore e 4 attacco tibiale del legamento crociato posteriore. [12]

I menischi sono tenuti in posizione da diversi legamenti, tra cui il legamento trasversale, i legamenti meniscofemorali e i legamenti meniscotibiali (coronari). Stabilizzando i menischi, questi legamenti sono anche indirettamente coinvolti nella prevenzione dello spostamento dell'articolazione del ginocchio. [9]

1.2 Legamenti del ginocchio

I legamenti sono bande forti e dure, non particolarmente flessibili. uniscono le ossa tra di loro, dando stabilità e forza all'articolazione del ginocchio.

- Legamento collaterale mediale (o *legamento collaterale tibiale*): Il legamento collaterale mediale (LCM) è una banda che scorre dall'epicondilo mediale del femore per inserirsi sulla tibia dalle due a tre dita sotto la linea mediale dell'articolazione.
- Legamento collaterale laterale (o *legamento collaterale fibulare*): Il legamento collaterale laterale (LCL) è una banda che scorre dall'epicondilo laterale del femore per inserirsi sulla tibia dalle due a tre dita sotto la linea mediale dell'articolazione.

I legamenti collaterali rinforzano la capsula articolare assicurando la stabilità laterale del ginocchio nell'estensione.

- Legamento crociato anteriore (LCA): origina dalla superficie prespinale tibiale, anteriormente e medialmente ai tubercoli tibiali, fra l'inserzione del corno anteriore del menisco mediale anteriormente e quella del menisco laterale posteriormente. Esso dalla tibia si porta obliquamente verso l'alto, lateralmente e posteriormente al femore, dove si inserisce sul margine posteriore della parete mediale del condilo femorale laterale. Il LCA è

composto da un fascio anteromediale (AM), teso in flessione, e da uno posterolaterale (LP), teso in estensione.

- Legamento crociato posteriore (LCP): si trova dietro il LCA e, come esso, si inserisce dalla tibia verso il femore. Limita principalmente il movimento posteriore della tibia rispetto al femore. Come il LCA, limita anche alcune rotazioni e movimenti laterali del ginocchio.

I due legamenti crociati risultano interseccati, oltre che tra di loro, anche in rapporto al legamento collaterale omologo.

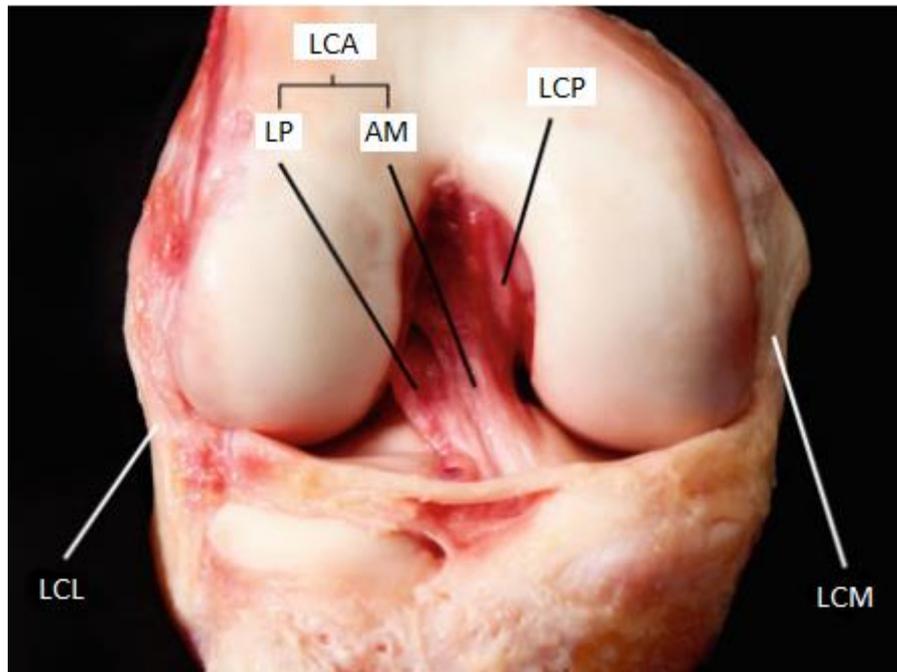


Figura 5 Legamenti del ginocchio (vista coronale)

- Legamento (o tendine) della rotula: *“proseguimento appiattito del tendine comune del muscolo quadricipite del femore. Esso si estende dai margini superiore e inferiore della rotula fino alla parte superiore della tuberosità della tibia. La superficie profonda è fusa con la capsula articolare del ginocchio, separata dalla membrana sinoviale tramite un cuscinetto di adipe. È detto anche legamento patellare.”* [13]

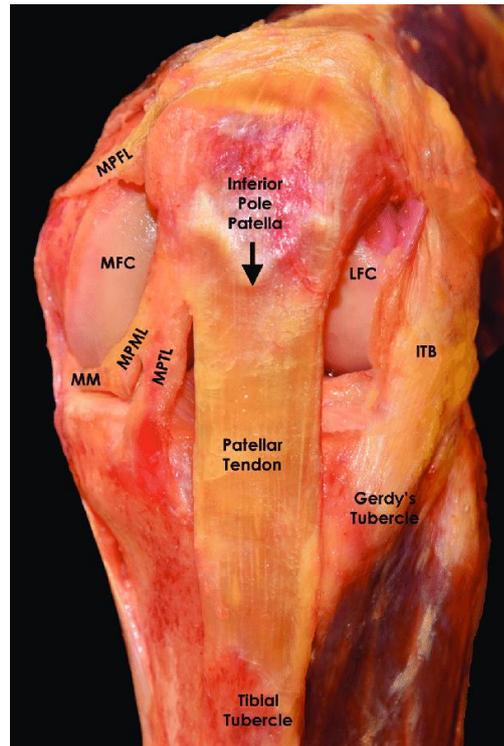


Figura 6 Legamento o tendine patellare [14]

- Capsula articolare: è una struttura spessa e fibrosa che avvolge l'articolazione del ginocchio. Al suo interno si trova la membrana sinoviale rivestita dal sinovio, una struttura di tessuto molle che secerne il liquido sinoviale. [15] [16]

1.4 Anatomia attraverso le immagini di risonanza magnetica (MRI)

La conoscenza dell'anatomia attraverso le tecniche di imaging è utile, in generale, per l'individuazione e comprensione di un'eventuale patologia nell'area di interesse. Di seguito viene descritta l'anatomia del ginocchio tramite immagini di risonanza magnetica (MRI) attraverso vari livelli rappresentativi, individuando le varianti anatomiche riscontrate di frequente. In questo studio l'analisi MRI è fondamentale per la realizzazione del modello matematico 3D dell'articolazione del ginocchio, che

verrà approfondita in seguito. Il protocollo, genericamente, prevede l'acquisizione delle immagini sui tre piani: assiale, sagittale e coronale. In generale, la valutazione ottimale si ottiene quando i piani di imaging sono orientati perpendicolarmente e paralleli all'asse lungo della struttura in questione. Il piano sagittale è utile per la valutazione del legamento crociato anteriore, delle corna dei menischi, dell'articolazione femoro-tibiale e della cartilagine articolare trocleare femorale. [17]

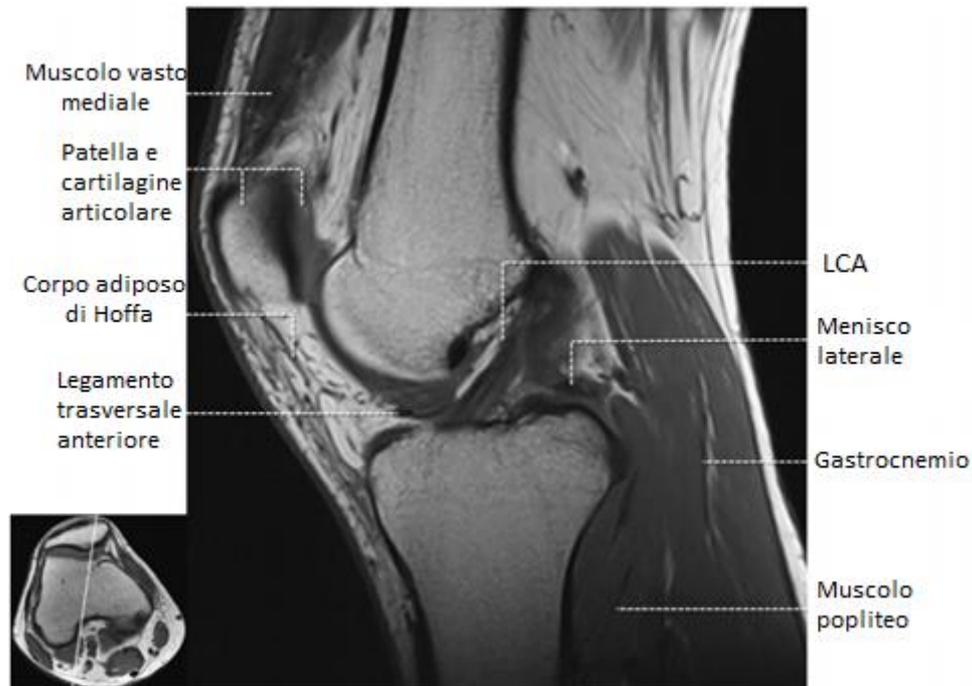


Figura 7 immagine MR acquisita sul piano sagittale [17]

Il piano coronale è preferito per la valutazione del corpo dei menischi e delle strutture stabilizzatrici mediali e laterali. [17]

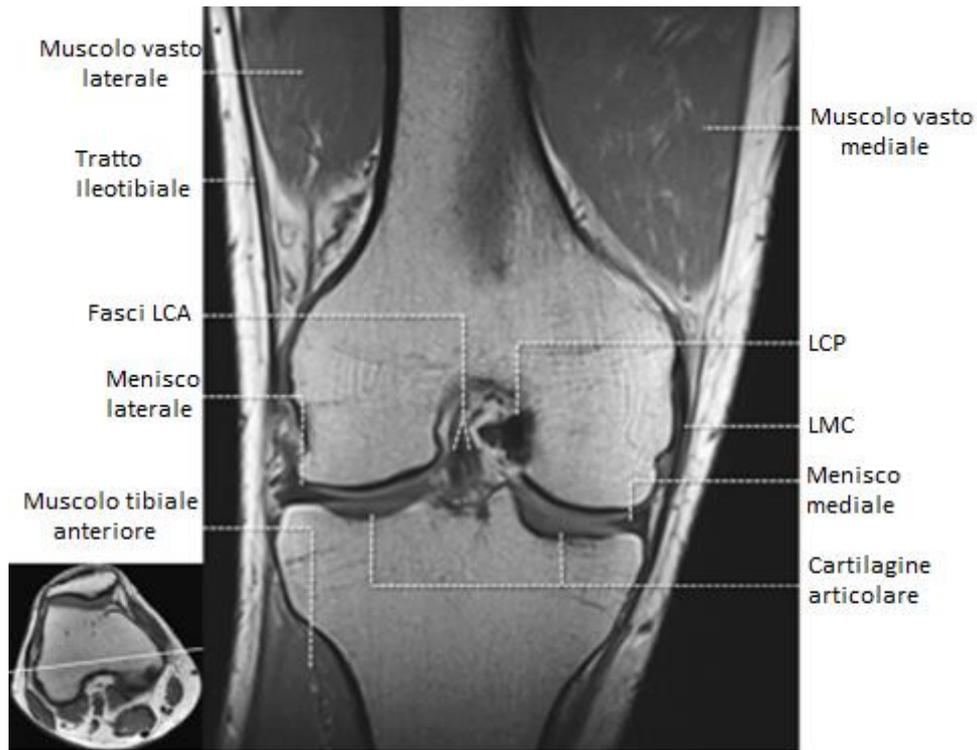


Figura 8 immagine MR acquisita sul piano coronale [17]

Il piano assiale, invece, viene utilizzato per valutare la cartilagine articolare rotulea, il tendine del quadricipite e le strutture stabilizzatrici mediali e laterali. [17]

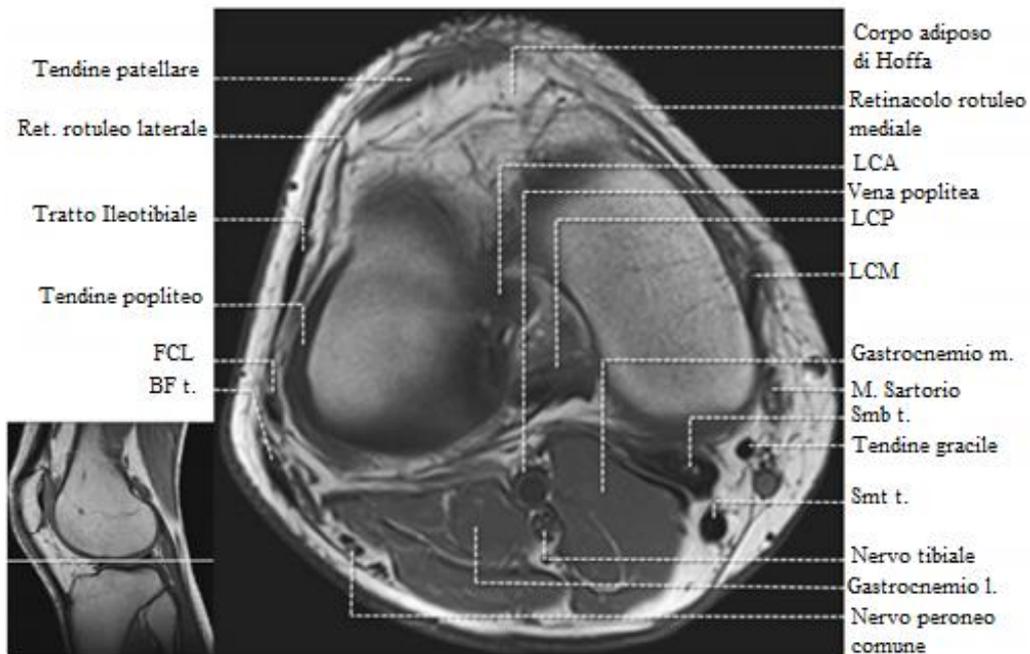


Figura 9 immagine MR acquisita sul piano assiale [17]

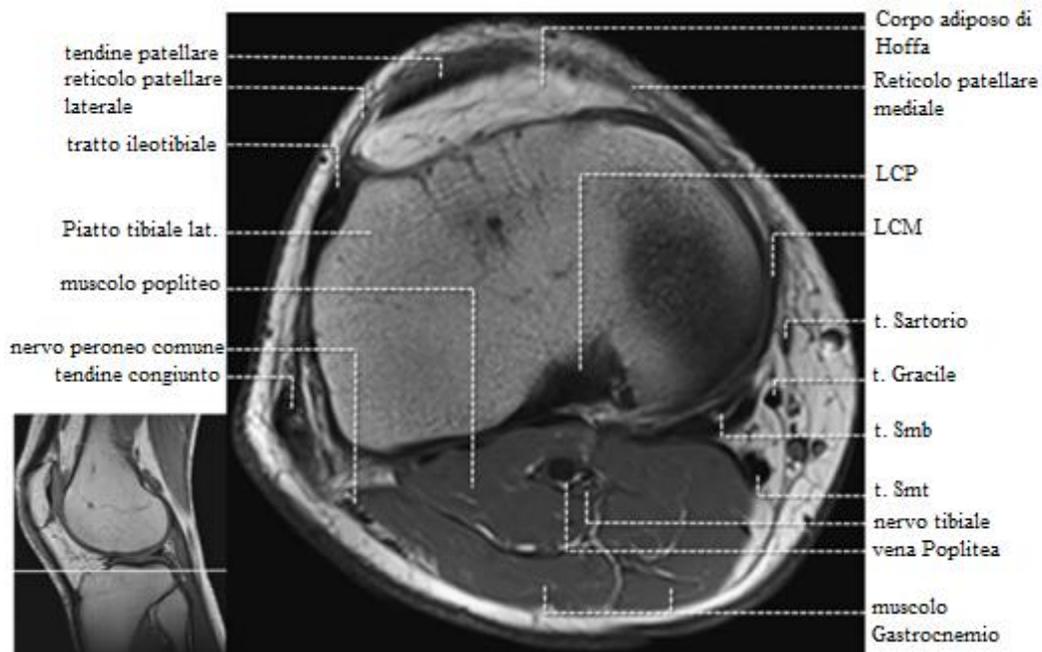


Figura 10 immagine MR acquisita sul piano assiale [17]

Capitolo 2

Il legamento crociato anteriore

2.1 Anatomia del legamento crociato anteriore

“Il legamento crociato anteriore (LCA) è inserito sulla tibia immediatamente davanti e lateralmente alla spina tibiale anteriore, passa sotto il legamento trasverso, in parte unendosi al corno anteriore del menisco laterale, e va indietro, in fuori e in alto, per inserirsi sul condilo femorale laterale”. [18]

Anatomicamente, è composto da una banda anteromediale, che si inserisce sulla regione anteromediale della tibia, e da una posterolaterale; l’inserzione tibiale risulta più resistente di quella femorale. Nel suo passaggio dalla tibia al femore assume un andamento spiroidale con un angolo di circa 110° . Il LCA è, inoltre, extra sinoviale, cioè di difficile visualizzazione artroscopica (necessaria un'apertura in caso di intervento), e intra-capsulare: in seguito ad una rottura del legamento il sangue genera un emartro. La lunghezza del legamento rimane pressoché costante (in media 21mm) nella flessione tra 60° e 120° , mentre aumenta dai 60° fino all'estensione completa, con un allungamento massimo dell'8% prima di andare in contro a rottura (1,7 mm circa). [18]

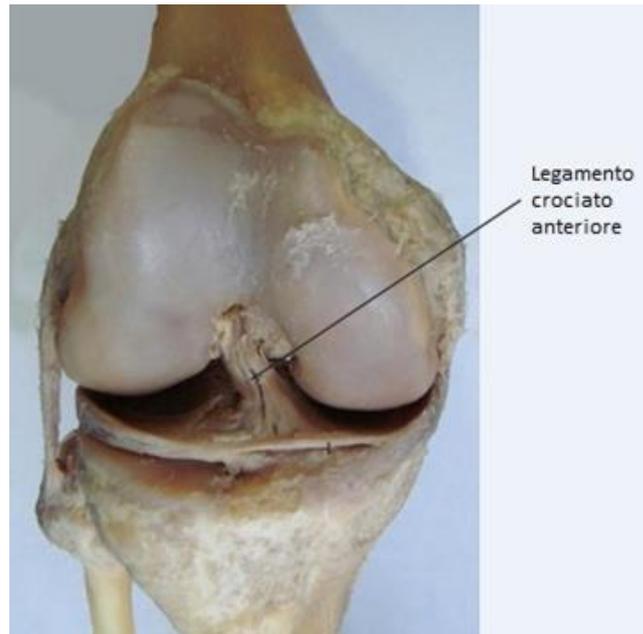


Figura 11 Il legamento crociato anteriore (vista frontale) [19]

2.2 Biomeccanica del legamento crociato anteriore

Il legamento crociato anteriore è il vincolo principale alla traslazione anteriore della tibia e un vincolo secondario alla rotazione tibiale e allo stress in varo e valgo. Un LCA intatto resiste a forze fino a 2500 N e una tensione di circa il 20% prima di fallire. I LCA di soggetti anziani vanno incontro a rottura con carichi inferiori rispetto ai LCA dei giovani. Le forze esercitate su un LCA intatto vanno da circa 100 N durante l'estensione passiva del ginocchio a circa 400 N durante la deambulazione e 1700 N in accelerazione-decelerazione. I carichi superano la tensione di rottura del LCA solo con combinazioni insolite di stress sul ginocchio. [20]

Durante la flessione il legamento si avvolge su sé stesso [21], così che solo la banda antero-mediale rimanga tesa. Durante l'estensione, invece:

- il legamento si svolge, in quanto ruota il punto d'inserzione, e le fibre si allineano;
- i due capi del legamento si allontanano l'uno dall'altro in relazione al punto d'inserzione femorale.

Questo fenomeno meccanico è dovuto all'andamento spiroidale delle fibre e dalla morfologia dei condili femorali.

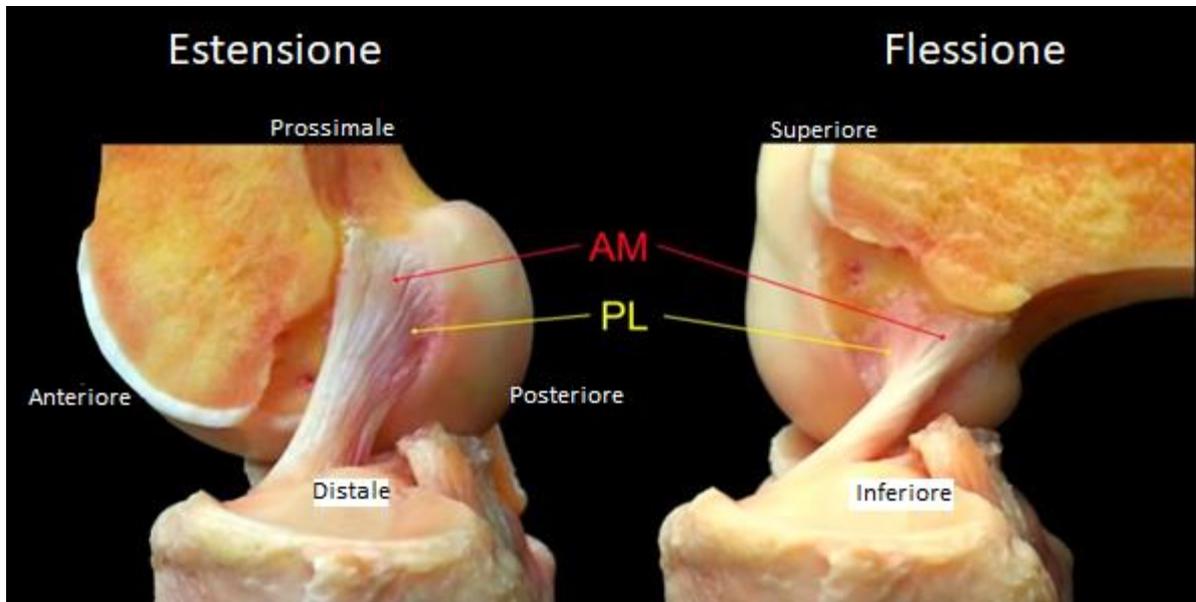


Figura 12 raffigurazione del LCA con il ginocchio in estensione e flessione (vista sul piano sagittale) [22]

L'eventuale presenza di lassità in estensione completa è messa in luce da movimenti di adduzione-abduzione o di cassetto anteriore o posteriore (traslazione postero-anteriore e antero-posteriore), movimenti che, generalmente, non sarebbero possibili. Se i legamenti rimangono in tensione senza movimenti articolari non voluti si ha una condizione chiamata close-pack. Il LCA evita la lussazione anteriore (dipendenza dell'86% circa); il LCP, invece, evita la lussazione posteriore della tibia sul femore (dipendenza del 94% circa). I due legamenti contribuiscono, inoltre, per circa 1/3 alla stabilità medio laterale evitando, dunque, le lussazioni tibiale laterale e mediale. [23] Sono composti prevalentemente da fibre collagene, con una piccola percentuale di fibre elastiche (10%), per cui dispongono, inoltre, di una grande forza di tensione. Queste fibre sono organizzate in fascicoli di alcuni millimetri di diametro e, in particolare nel LCA, ne sono presenti due tipi differenti: i primi scorrono tra le inserzioni tibiale e femorale, i secondi si avvolgono attorno all'asse longitudinale del LCA, con un asse elicoidale di 25°. Questa particolare configurazione delle fibre permette un aumento della forza in proporzione al carico esercitato sull'articolazione. La risposta al carico può essere distinta in due fasi: nella prima si osserva una deformazione elastica prima

del punto di snervamento; nella seconda la deformazione è irreversibile provocando la rottura dei legamenti.

La forza dei legamenti può essere influenzata da diversi fattori:

- età: la forza diminuisce con gli anni, mantenendo comunque una buona rigidità (stiffness);
- immobilizzazione: può provocare una riduzione della forza di tensione fino al 60%;
- rotazione interna: riduce la forza di tensione fino a circa il 6%, aumentando, invece, le forze torsionali, dannose per i crociati;
- l'esercizio: la forza può aumentare, anche se di poco, svolgendo attività.

Le inserzioni ossee dei legamenti si compongono di fibre collagene e di fibrocartilagine, presentandosi, quindi, come una zona di transizione. In questo modo si ha una variazione progressiva della rigidità, evitando una concentrazione degli sforzi. [23] Il LCA è responsabile dello scivolamento, durante la flessione, del condilo in avanti in combinazione con un rotolamento all'indietro. Nell'estensione, invece, è il LCP che permette lo scivolamento all'indietro assieme al rotolamento verso avanti. [24]

2.3 Epidemiologia di lesione del legamento crociato anteriore

La lesione del LCA è l'infortunio che avviene con più frequenza nell'articolazione del ginocchio e si verifica soprattutto in sport che richiedono rapidi cambi di direzione, salti e atterraggi, oltre che uno stretto contatto con altri giocatori (calcio, basket, football americano, sci). Essendo una lesione legata prevalentemente allo sport, vengono interessati soprattutto soggetti relativamente giovani e attivi fisicamente. [25] Studi epidemiologici hanno evidenziato un'incidenza di circa 320.000 lesioni l'anno negli Stati Uniti (con una popolazione di circa 320 milioni di abitanti). Confrontando questi numeri con i registri ufficiali di altri paesi si ha una conferma di questo dato: in

Scandinavia (popolazione = 25 milioni), si hanno circa 17500 lesioni l'anno, in Germania (popolazione = 82 milioni) circa 87400 lesioni e in Svizzera (popolazione = 8 milioni) circa 8740. [26] Uno studio effettuato sulla popolazione della Nuova Zelanda ha evidenziato un'incidenza di 36,9 lesioni per 100.000 abitanti. [27]

Non si hanno dati ufficiali relativi l'Italia, perciò, è stata effettuata una stima confrontando i dati precedenti, eseguendo una media sulle lesioni annue. È stato, dunque, calcolato l'incidence rate (IR) per ogni popolazione in esame (su 100.000 abitanti) e la probabilità di andare in contro a lesione (sull'intera popolazione).

Paese	POPOLAZIONE (n° abitanti)	LESIONI/ANNO	IR	Probabilità di incidenza (%)
USA	328 milioni	320.000	97,56	0,10
GERMANIA	82 milioni	87.360	106,53	0,11
SCANDINAVIA	25 milioni	17.492	70	0,07
SVIZZERA	8 milioni	8.736	109,2	0,11
NUOVA ZELANDA	4 milioni	1.476	36,9	0,04
ITALIA	60 milioni	57.400*	95,6*	0,10*

*Tabella 1 Dati sull'incidenza della rottura del LCA nelle varie popolazioni; *dati stimati*

Questo tipo di infortunio presenta delle differenze per quanto riguarda sesso ed età. In uno studio del 2014 è stato messo in evidenza come il numero delle ricostruzioni sia aumentato (negli USA) nei pazienti di età inferiore a 20 anni e in quelli di età pari o superiore a 40 anni in un arco di 12 anni (1994-2006). [28]

Age, y	1994		1995		1996		2006	
	Total	Per 100,000 Person-Years	Total	Per 100,000	Total	Per 100,000 Person-Years	Total	Per 100,000 Person-Years
<20	32,155	12.22	40,005	15.02	41,500	15.41	53,653	17.97
20-29	30,740	11.683	34,856	13.09	29,030	10.78	26,815	8.98
30-39	17,724	6.74	18,063	6.78	21,160	7.86	20,846	6.98
≥40	4343	1.65	7954	2.98	10,828	4.02	22,588	7.57
Total	86,687	32.94	10,3398	38.83	104,167	38.67	129,836	43.48

Figura 13 Incidenza di ricostruzione in base all'età [28]

Più recentemente gli studi hanno mostrato un incremento del rischio di rottura del LCA nelle donne rispetto agli uomini da 1,4 a 9,5 volte maggiore, e gli infortuni si verificano più frequentemente tra i 14-18 anni nelle donne e tra i 19-25 negli uomini. [29] Sono numerose le differenze tra donne e uomini che potrebbero giustificare le cause di questa maggiore suscettibilità. Possiamo trovare differenze anatomiche, neuromuscolari e di flessibilità. Tra le differenze anatomiche: il bacino più largo rispetto; il ginocchio più valgo; una maggiore rotazione esterna della tibia e una muscolatura meno sviluppata.



Figura 14 Gli uomini di solito atterrano con le ginocchia divaricate (posizione "a basso rischio"), mentre le donne atterrano in una posizione in valgo vicino alla piena estensione che porta a uno stress eccessivo sul LCA (posizione "a rischio elevato"). [26]

Queste differenze anatomiche pongono il LCA nelle donne in uno svantaggio di tipo meccanico, più propenso alla rottura in particolare durante l'atterraggio dopo un salto, dove la tensione a rottura del legamento viene superata dalla tensione dovuta alle forze rotazionali.

Nelle caratteristiche neuromuscolari vi è nelle donne una minore capacità rispetto agli uomini di generare forze muscolari, limitando così la capacità di resistere agli spostamenti di carico con la stabilizzazione dinamica del ginocchio. Un'altra caratteristica che aumenta il rischio di lesione è rappresentata da una attivazione muscolare e una capacità di generare forza più lentamente dell'uomo e un maggior reclutamento del muscolo quadricipite a discapito dei muscoli ischio crurali. Le donne, inoltre, presentano una lassità del ginocchio maggiore rispetto agli uomini che si traduce in una maggior iperestensione dell'articolazione: ciò svantaggia gli ischi crurali nel generare una forza protettiva. [30]

2.4 Cause di rottura del legamento crociato anteriore

La lesione del LCA avviene più comunemente negli sport da contatto e per l'80% negli sport con "pivoting" (sci, basket, volley, rugby, calcio) [31], in dinamiche come l'atterraggio dopo un salto, inversione rapida di direzione attorno ad un solo arto (fa da perno) o un'eccessiva iperestensione del ginocchio con il piede bloccato. La lesione avviene spesso in modo imprevedibile e rapidamente, perciò è complicato stabilire le dinamiche al momento dell'infortunio, come la posizione dell'articolazione o le forze in gioco durante il movimento che ha portato alla rottura del legamento. [32]

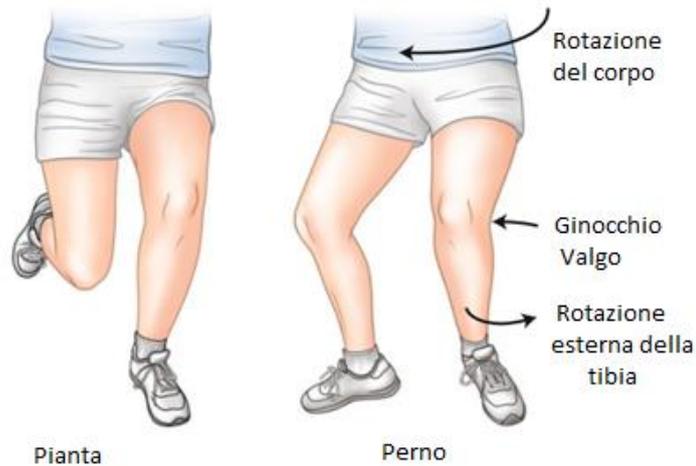


Figura 15 Movimento “pianta e perno”. In questo movimento, il giocatore sta piantando la gamba sinistra in una posizione flessa. Mentre va a calciare la palla, ruoterà attorno a questa gamba piantata. Un LCA normale è fondamentale per la stabilità durante questa manovra. [26]

La seconda causa principale di lesione del legamento è il così detto “trauma da cruscotto”, che avviene in seguito ad un incidente di tipo stradale. Questo trauma può provocare una lesione parziale o totale, interessando spesso anche altre strutture dell’articolazione come i menischi, altri legamenti o la cartilagine. Al momento dell’infortunio il soggetto percepisce un cedimento, uno strappo all’interno del ginocchio, seguito, poi, da ulteriori sintomi come dolore, gonfiore e difficoltà nel movimento.

È possibile alleviare il dolore e il gonfiore mediante riposo, ghiaccio o l’uso di FANS; l’instabilità, invece, persiste e non permette al paziente di ritornare all’attività sportiva in tempi brevi. [31]

Le lesioni del LCA non sono tutte uguali. Vi è un sistema di classificazione delle lesioni legamentose, in cui sono riconosciuti tre gradi di danno differenti:

- Grado I: la lesione è molto lieve; si ha una perdita di tensione del legamento che non crea, nel complesso, un danno funzionale. [33] Il legamento si allunga ma l’articolazione rimane stabile; [34]

- Grado II: in questo caso il legamento subisce una lesione moderata o parziale (diventa sfilacciato o assottigliato). Il ginocchio viene percepito come instabile, spesso associato ad una sensazione di cedimento durante il cammino; [33]
- Grado III: il LCA va incontro ad una rottura completa o lacerazione che ne compromette la funzionalità, oltre che la stabilità del ginocchio. Per quanto riguarda l'infiammazione del legamento, invece, esso non mostrerà segni di danno alla sua struttura, ma tumefazione e dolore a causa dello stress. [33]



Figura 16 Lesione del legamento crociato anteriore [35]

2.5 Diagnosi

La diagnosi di lesione del legamento crociato anteriore spesso non può essere eseguita al momento dell'incidente a causa della sintomatologia, perciò viene effettuato, in genere, dopo qualche ora dall'infortunio. In caso di lesione risulterà evidente:

- un ballottamento rotuleo, cioè rimbalzo contro il piano osseo sottostante;
- una riduzione dell'escursione articolare;
- una dolorabilità diffusa;

- la positività di specifici test clinici fisici che evidenziano la lassità anteriore dell'articolazione. [36]

I test principali che possono essere effettuati sono i seguenti:

- il test del cassetto anteriore: prevede il paziente in posizione supina, con anca e ginocchio flessi, rispettivamente, a 45° e 90°. Il fisioterapista blocca il piede del soggetto ed esegue con le mani sulla zona prossimale della tibia una forza postero-anteriore [37]

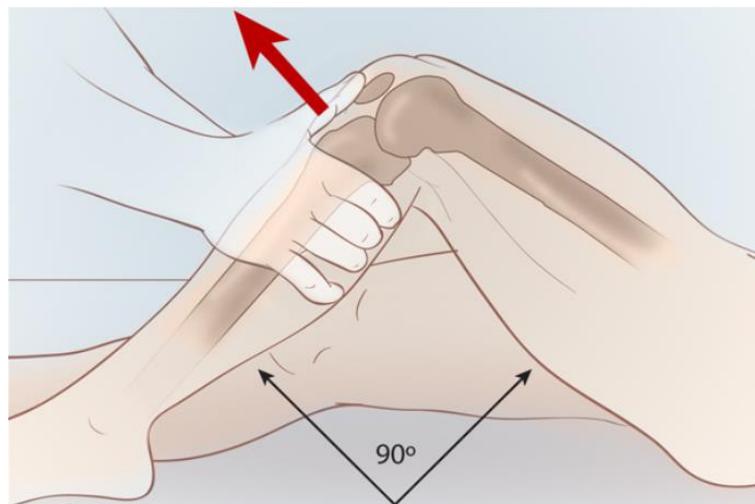


Figura 17 Test del cassetto anteriore [38]

- il test di Lachman: è il test più accurato per rilevare una lesione del LCA. [39] Il paziente viene posizionato supino, il ginocchio flesso a 20-30 gradi e la gamba ruotata leggermente esternamente per rilassare la benderella ileo tibiale. L'esaminatore usa quindi una mano per stabilizzare il femore distale mentre usa l'altra mano per afferrare la tibia prossimale. Applica, quindi, una forza anteriore alla tibia prossimale nel tentativo di sublussare la tibia in avanti mantenendo il femore stabilizzato. [37] Il test è considerato positivo in seguito alla presenza di un'eccessiva traslazione anteriore della tibia prossimale. [40]



Figura 18 Test di Lachman [20]

- il pivot shift test: Il ginocchio viene flesso a 30 gradi. L'esaminatore pone una mano sotto il tallone e l'altra sulla parte laterale della tibia prossimale, quindi applica una forza in valgo. Il ginocchio viene, dunque, portato in estensione. In caso di rottura, il piatto tibiale si ritroverà in posizione anatomica nella flessione mentre, durante l'estensione, sublusserà anteriormente. [20]

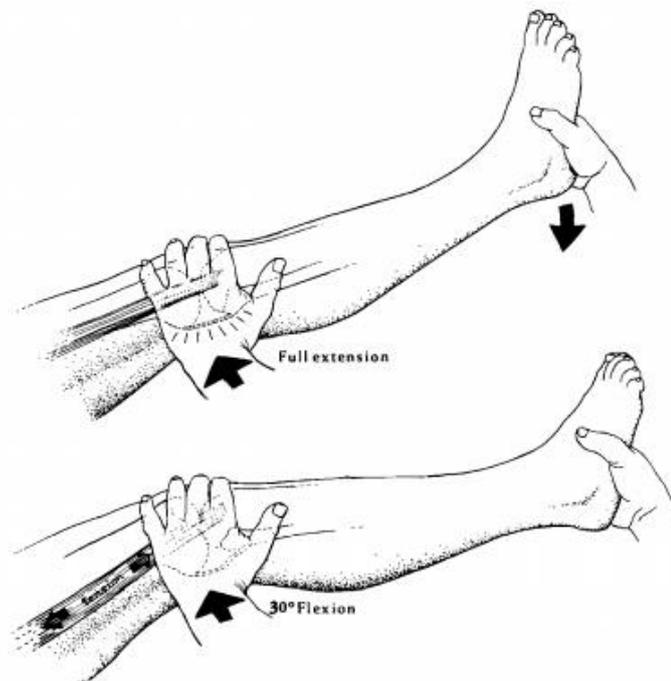


Figura 19 Pivot shift test [20]

- il Jerk-test: utile per valutare l'instabilità anterolaterale del ginocchio. Questa manovra è simile al pivot shift, ma prevede il ginocchio flesso e la tibia ridotta. Si applica una forza in valgo e in rotazione interna della tibia; il ginocchio viene gradualmente esteso. Se il legamento crociato anteriore risulta lesa si avverte uno scatto (in inglese jerk) più netto a 30° di flessione, dovuto alla sublussazione della tibia. [41]

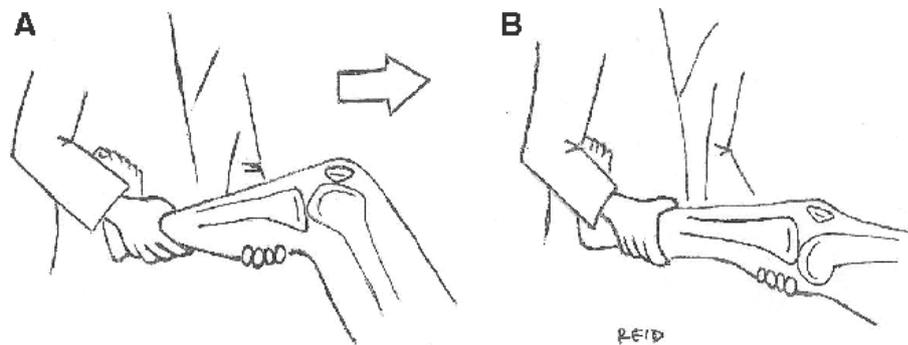


Figura 20 Jerk test [42]

Con lo sviluppo della medicina sportiva e della chirurgia ricostruttiva del LCA, il pivot shift potrebbe diventare il punto di riferimento per misurare il successo dei trattamenti chirurgici. Il test di Lachman rimane, invece, lo standard per la rilevazione di una traslazione anteriore (uniplanare).

Una delle difficoltà del pivot shift è la natura soggettiva dell'esame: la valutazione si basa sulla percezione dell'esaminatore nel cambiamento di movimento che si verifica durante la manovra. L'esaminatore, perciò, può interpretare erroneamente una lassità fisiologica come patologica. La coesistenza di altre lesioni dei tessuti molli nelle ginocchia con deficit di LCA, inoltre, rende più difficile l'interpretazione. Sebbene i limiti del test del pivot shift ne impediscano il suo utilizzo come gold standard, rimane prezioso per altri motivi, come la sua elevata specificità. [43]

La diagnosi, dunque, è essenzialmente clinica ed è rafforzata, inoltre, attraverso alcuni test di imaging. Questi sono utili per l'identificazione precisa della lesione,

confermando il risultato dei test fisici. I principali test di imaging che vengono eseguiti sono:

- radiografia: utile per escludere la presenza di fratture o altre lesioni ossee. Indaga sulla salute di menischi, legamenti e cartilagine;



Figura 21 radiografia di un ginocchio con lesione al LCA

- risonanza magnetica: valuta l'entità della lesione e identifica la presenza di lesioni associate; [31] rappresenta il gold standard per una diagnosi sicura; [44] ha un'elevata sensibilità per quanto riguarda la rottura completa del LCA, maggiore rispetto ai casi di rottura parziale. [45]



Figura 22 vista sagittale di una risonanza magnetica su un ginocchio con LCA lesionato

- ecografia: utile per la valutazione dei tessuti molli, come avviene nella risonanza magnetica, ma è più specifica nell'accertamento della salute di muscoli e tendini. [46]

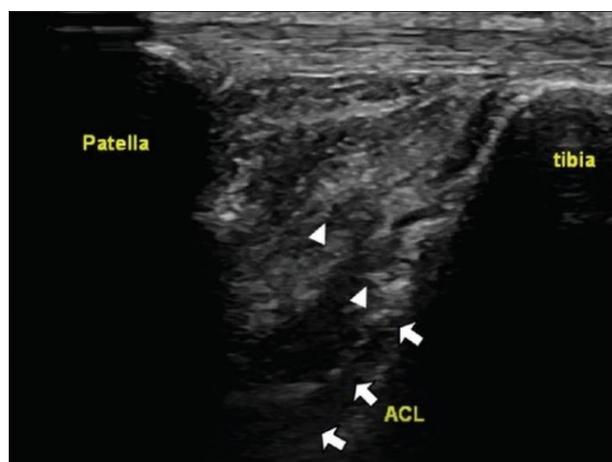


Figura 23 ecografia di un ginocchio

Non esiste, dunque, un test preferenziale nella diagnosi della lesione del LCA. Tra quelli presentati si utilizza il più utile per la valutazione del paziente in base alle sue caratteristiche e allo specifico caso clinico. La positività a uno o più test clinici aumenta sicuramente la precisione della diagnosi e quando persiste una elevata

probabilità di lesione si procede con gli esami strumentali, in particolare la risonanza magnetica. I pazienti, quindi, non devono essere sempre inviati a eseguire questo test [47]: secondo Kun L. et al. l'uso inappropriato della risonanza magnetica potrebbe provocare errori nella diagnosi, soprattutto per quanto riguarda lesioni parziali croniche. [48]

2.6 Trattamento del legamento crociato anteriore lesionato

In caso di rottura del LCA, il trattamento iniziale della lesione consiste in:

- Riposo funzionale: è opportuno l'utilizzo di bastoni canadesi subito dopo il trauma per scaricare l'arto;
- Crioterapia (ghiaccio);
- Applicazione di un tutore in estensione a scopo antalgico;
- Elevazione dell'arto.

Questi trattamenti, uniti ad una terapia medica, permettono di ridurre il gonfiore e la sintomatologia dolorosa. [49] In caso di lesione isolata con lieve dolore è sufficiente l'uso di una ginocchiera protettiva per 20 giorni, senza limitare, dunque, la deambulazione. se la lesione, invece, fosse associata a una rottura dei legamenti collaterali, potrebbe essere necessario utilizzare una ginocchiera che immobilizzi il ginocchio a 30° per 15 giorni; in seguito, verrà sbloccata con articolari limitati tra 0° e 90° di flessione per ulteriori 10 giorni. [36] Dopo questa prima fase, la deambulazione è libera senza tutore e con il carico diretto. Affinché il recupero sia rapido e completo solitamente il paziente segue un protocollo riabilitativo. Al termine di questo protocollo riabilitativo in fase acuta (circa tre settimane dal trauma) viene eseguita una visita di controllo per la programmazione del trattamento successivo, che può essere chirurgico o riabilitativo. [49]

Un intervento chirurgico viene solitamente effettuato in soggetti che necessitano di ritornare ad un'attività sportiva professionale, solitamente entro 4-6 settimane dall'infortunio. Il legamento crociato lesionato viene generalmente sostituito con una

porzione di tendine rotuleo o di tendine dei muscoli ischio crurali. Dopo l'intervento il paziente effettua ginnastica riabilitativa per un potenziamento mirato della muscolatura della coscia. Inoltre, l'articolazione non deve essere sottoposta ad un carico completo per circa 6-12 settimane, perciò si applica un supporto al ginocchio mediante l'uso di un'ortesi. [50]

Capitolo 3

Ricostruzione del legamento crociato anteriore

L'intervento di ricostruzione del LCA permette il recupero della stabilità (statica e dinamica) dell'articolazione del ginocchio con un grado di movimento quasi equivalente. Permette, dunque, un rapido ritorno all'attività quotidiana, che sia essa professionale o sportiva. Si tratta di un intervento di sostituzione tramite trapianto tendineo, usualmente una porzione del tendine rotuleo autologo. È possibile, in alternativa, utilizzare due tendini dei muscoli flessori (tendine dei muscoli semitendinoso e gracile) oppure il tendine quadricipitale. Raramente si utilizza un innesto da donatore (allograft). [49] La tecnica di ricostruzione prevede prima di tutto il controllo in artroscopia dell'effettiva lesione del LCA, inserendo nell'articolazione una soluzione fisiologica acquosa che migliora la visibilità. Poi, l'eventuale prelievo del tendine scelto per la ricostruzione e la realizzazione dei tunnel ossei, nella tibia e nel femore. Il neo-legamento viene, generalmente, inserito nel tunnel tibiale e condotto fino al tunnel femorale, per poi essere fissato tramite viti (metalliche o riassorbibili), cambre, o altre tecniche sempre più all'avanguardia (Rigid-Fix®; Trans-Fix®, Endobutton® ed altre ancora). [44]

3.1 Graft o Innesti

La scelta del neo-legamento è fondamentale ed il chirurgo ortopedico ha diverse possibilità: tendine rotuleo, tendine del muscolo semitendinoso, tendine

quadricipitale, lembi di fascia lata, tendine sintetico, tendine da donatore. [44] Di seguito vengono presentati i vari tipi di innesto:

- Tendine rotuleo autologo: la ricostruzione LCA con tendine rotuleo prevede l'espianto del terzo centrale del tendine rotuleo attraverso una cicatrice mediana di circa 5 cm e poi il suo inserimento in articolazione attraverso un tunnel osseo tramite guida artroscopica. [51]

Utilizzata da alcuni chirurghi come “gold standard” per la ricostruzione del LCA [52], presenta diversi vantaggi come le dimensioni dell'innesto, dalla fissazione osso-osso che garantisce un'ottima osteointegrazione, dalla rigidità e resistenza. [53] Questo tipo di intervento, d'altro canto, tende ad indebolire i muscoli estensori del ginocchio e pertanto carichi eccessivi in riabilitazione possono causare tendinopatie relative al tendine rotuleo e al tendine quadricipitale ritardando i tempi di recupero. [51] Presenta, perciò, svantaggi quali: dolore postoperatorio dietro la rotula, dolore inginocchiandosi e lieve aumento del rischio di rigidità postoperatoria. [52] Il tendine rotuleo è stato considerato per decenni il gold standard nella ricostruzione del legamento crociato anteriore, grazie a importanti qualità come robustezza e facilità di prelievo. Il suo utilizzo è stato progressivamente ridotto in seguito allo sviluppo di tecniche chirurgiche che hanno consentito il raggiungimento di analoghi risultati mediante l'utilizzo dei tendini ischio crurali (semitendinoso e gracile, “hamstrings” nella letteratura anglosassone). [54]

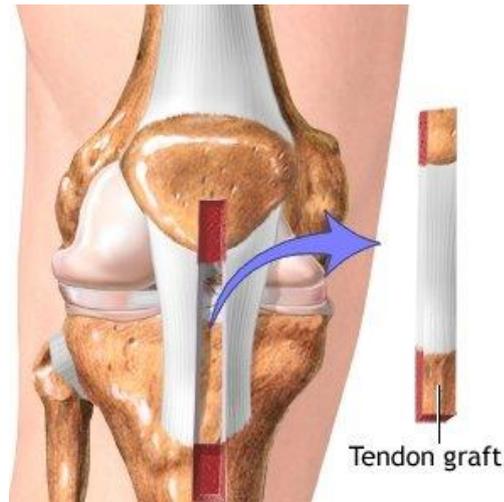


Figura 24 Tendine rotuleo autologo [55]

- Tendine gracile e semitendinoso (autologhi): è il trapianto più diffuso in Italia per la facilità del prelievo, la bassa morbilità e la facilità del processo di riabilitazione postoperatoria. Il prelievo viene eseguito disinserendo il tendine del gracile e del semitendinoso dalla loro inserzione sulla zampa d'oca. I due tendini sono molto lunghi e possono essere quindi raddoppiati, triplicati o quadruplicati per rendere il neo-tendine più resistente. D'altro canto, presenta svantaggi quali: maggior difficoltà nel prelievo, allargamento del tunnel e un'osteointegrazione più lenta. [56]



Figura 25 Tendine gracile e semitendinoso [57]

- Tendine quadricipitale: vengono utilizzati il terzo centrale del tendine quadricipitale del paziente ed una bratta ossea dall'estremità superiore della rotula. Questa tendine permette di ottenere un innesto più grande, adatto a pazienti più alti e più pesanti. Poiché vi è un innesto osseo su un solo lato, la fissazione non è stabile come per l'innesto di tendine rotuleo. [52] Presenta vantaggi quali: minor dolore del sito donatore rispetto al trapianto del tendine rotuleo e una larga area della sezione di taglio. Gli svantaggi, invece, sono: possibili complicazioni nel sito donatore e cosmesi. [58]

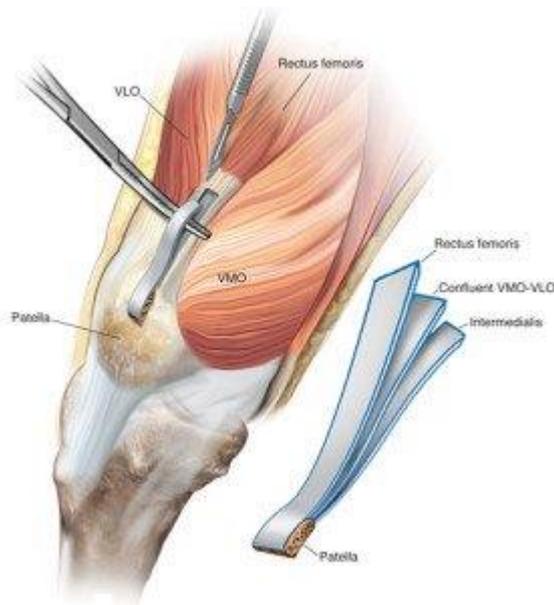


Figura 26 Tendine quadricipitale[59]

- Lembi di fascia lata: Dopo aver subito la ricostruzione del legamento crociato anteriore (LCA), i pazienti devono recuperare almeno l'80% della forza del tendine del ginocchio e del quadricipite per ritornare a praticare sport senza rischio per l'innesto. Il prelievo del tendine rotuleo porta a grandi deficit nella forza del quadricipite, mentre il prelievo dei tendini del ginocchio porta a un deficit nella forza del tendine. Invece, è stato dimostrato che la ricostruzione del LCA con lembi della fascia lata preserva l'equilibrio fisiologico tra i movimenti di flessione ed estensione della gamba: il rapporto tra i due movimenti è molto simile ai valori naturali. [60]

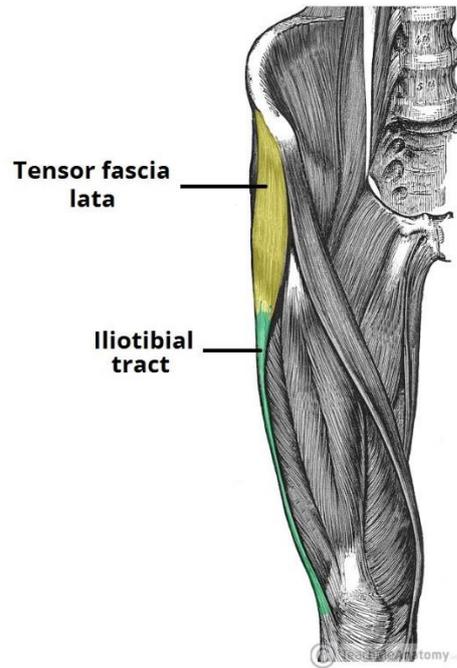


Figura 27 Tensore della fascia lata [61]

- Graft sintetico: I principali vantaggi legati all'utilizzo di un legamento sintetico nella ricostruzione del LCA sono: un celere recupero della stabilità, il rapido periodo riabilitativo e l'assenza di prelievo di strutture autologhe. [62] In passato vennero utilizzati materiali come fibre di carbonio, Dacron® e Gore-Tex®. [63] Essi presentarono, però, diversi svantaggi come scarsa biocompatibilità e instabilità.



Figura 28 Graft sintetico in Gore-Tex [26]

Recentemente si è verificata una ripresa di interesse nel loro utilizzo, sfruttando il LARS (Ligament Advanced Reinforcement System), un legamento sintetico di seconda generazione. Il LARS® è costituito da fibre di polietilentereftalato (PET); il segmento intraosseo è costituito da fibre longitudinali unite insieme da una struttura a maglia trasversale, il segmento intra-articolare è composto da fibre longitudinali parallele arrotolate e piegate a 90°. Grazie alle sue caratteristiche strutturali, questo graft sintetico si mostra il più simile al LCA per anatomia e meccanica. Diversi studi clinici hanno mostrato risultati molto promettenti nell'uso del LARS®, evidenziando una diminuzione di sinoviti o problemi di tipo meccanico come cedimento o lassità dell'innesto. [64] D'altro canto, presenta svantaggi come: necessità di grande esperienza chirurgica; elevato costo (circa 2000 euro); intervento scarsamente praticato dalle strutture ospedaliere; assenza di studi a lungo termine (oltre i 10 anni dall'impianto) e, dunque, l'impossibilità di definire con certezza ipotetici fallimenti meccanici e di dare linee guida specifiche. [65]

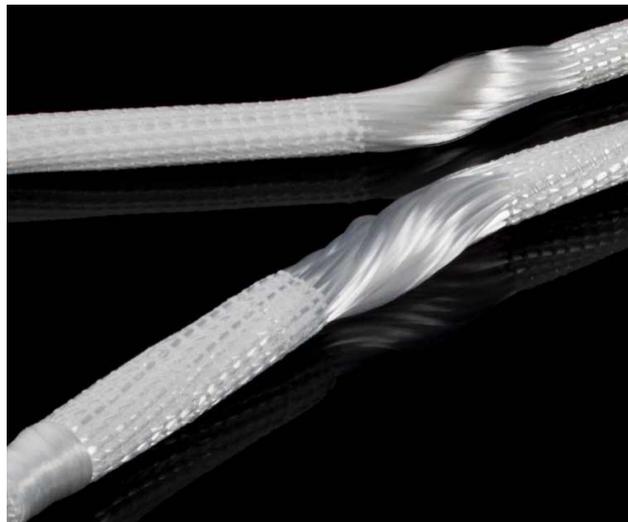


Figura 29 LARS (Ligament Advanced Reinforcement System)

- Tendine da donatore (“allograft”): la ricostruzione avviene con un tendine proveniente da un donatore d’organi, scelto in base alle necessità dell’individuo. Questo graft deve essere opportunamente preparato e tensionato. Una volta realizzati i tunnel ossei, l’allograft viene inserito al loro interno e viene fissato all’osso mediante diversi sistemi in modo da ottenere una perfetta integrazione. Tra i vantaggi sicuramente vi è una riabilitazione molto più semplice, mentre lo svantaggio è quello di una graduale perdita di tensione nel tempo. Il tendine da donatore, perciò, è indirizzato verso pazienti sopra i 40 anni la cui priorità è la stabilità articolare piuttosto che un grosso impatto riabilitativo. [66]

Nella seguente tabella vengono riassunti i diversi tipi di innesti con i relativi vantaggi e svantaggi.

GRAFT	VANTAGGI	SVANTAGGI
Tendine rotuleo autologo	<ul style="list-style-type: none"> • Buone dimensioni dell'innesto; • ottima osteointegrazione; • rigidità e resistenza; • robustezza; • facilità di prelievo 	<ul style="list-style-type: none"> • dolore postoperatorio dietro la rotula; • dolore inginocchiandosi e lieve aumento del rischio di rigidità postoperatoria
Tendine gracile e semitendinoso	<ul style="list-style-type: none"> • facilità del prelievo; • bassa morbilità; • facilità del processo di riabilitazione postoperatoria 	<ul style="list-style-type: none"> • maggior difficoltà nel prelievo; • allargamento del tunnel; • osteointegrazione più lenta
Tendine quadricipitale	<ul style="list-style-type: none"> • innesto più grande, adatto a pazienti più alti e più pesanti; • minor dolore del sito donatore rispetto al trapianto del tendine rotuleo; • larga area della sezione di taglio 	<ul style="list-style-type: none"> • la fissazione non è stabile come per l'innesto di tendine rotuleo; • possibili complicazioni nel sito donatore e cosmesi
Lembi di fascia lata	<ul style="list-style-type: none"> • preserva l'equilibrio fisiologico tra i movimenti di flessione ed estensione della gamba 	<ul style="list-style-type: none"> • Il prelievo del tendine rotuleo porta a grandi deficit nella forza del quadricipite; • il prelievo dei tendini del ginocchio porta a un deficit nella forza del tendine.
Graft sintetico	<ul style="list-style-type: none"> • recupero immediato della stabilità; • rapido periodo riabilitativo; • assenza di prelievo di strutture autologhe 	<ul style="list-style-type: none"> • scarsa biocompatibilità e instabilità.
Tendine da donatore	<ul style="list-style-type: none"> • riabilitazione molto più semplice 	<ul style="list-style-type: none"> • può perdere la tensione originaria negli anni rendendo un po' più elastico il ginocchio

Tabella 2 vantaggi e svantaggi degli innesti utilizzati nella ricostruzione del LCA

3.2 Tecniche di ricostruzione

Il chirurgo può decidere se procedere con una tecnica di ricostruzione anatomica, che permette di ricreare il comportamento dinamico dei due fasci del LCA (prelievo di tendine rotuleo, tendine quadricipitale, tensore della fascia lata, allograft, tendine sintetico ecc.), oppure con una tecnica di ricostruzione non anatomica, che consiste essenzialmente in una trasposizione tendinea, in quanto il semitendinoso (talvolta il gracile) viene disinserito solo prossimalmente e trasportato all'interno dell'articolazione copiando il percorso del LCA naturale. [67] Affinché l'innesto riproduca il più fedelmente possibile il legamento nativo è molto importante valutare la posizione e le dimensioni delle impronte ("footprints") tibiale e femorale del LCA, oltre che tensionare al meglio l'impianto. Un altro importante parametro, che incide sull'orientamento e direzione del graft, è la dimensione della gola intercondiloidea. Nella ricostruzione anatomica i tunnel ossei devono avere una corretta angolazione per evitare di generare tensioni nelle inserzioni del legamento che ne provocherebbero un rapido deterioramento. La ricostruzione, inoltre, può essere una ricostruzione a singolo fascio (SF) o a doppio fascio (DF). [68]



Figura 30 Ricostruzione a singolo fascio e doppio fascio [69]

Il LCA è composto, infatti, da due fasci di fibre primarie con funzioni diverse durante il movimento di flesso-estensione del ginocchio: il fascio antero-mediale (AM)

stabilizza il ginocchio durante la flessione, mentre quello postero-laterale (PL) controlla la rotazione tibiale e stabilizza il ginocchio durante l'estensione nel range 20°-0°. La maggior parte degli interventi di ricostruzione del LCA viene eseguita utilizzando una ricostruzione a SF, utilizzando un innesto tendineo per sostituire il LCA strappato (è necessario un solo tunnel osseo). [70] La ricostruzione del LCA con tecnica a SF ha dimostrato buoni risultati, controllando in modo soddisfacente l'instabilità antero-posteriore; non altrettanto quella rotatoria. [71] Per risolvere questo problema la tecnica ha subito un processo evolutivo nel corso degli anni, soprattutto relativamente alla realizzazione e orientamento del tunnel femorale. Si è giunti, dunque, ad una tecnica di ricostruzione del LCA mediante l'utilizzo di un doppio fascio. [72]

La procedura di ricostruzione LCA a DF prevede l'uso di due innesti più piccoli, invece di uno solo più grande. Si effettua, perciò, una ricostruzione per ogni fascio: vengono realizzati due ulteriori tunnel ossei per l'inserimento del secondo innesto e, dunque, un'incisione aggiuntiva [72]. In alternativa è possibile creare un unico tunnel in cui vengono alloggiati, e successivamente fissati, entrambi i fasci. [73]

La tecnica artroscopica a SF è stata considerata per diverso tempo il gold standard per la ricostruzione del legamento crociato anteriore, mediante tendini autologhi come il tendine rotuleo, bicipite femorale o quadricipite o con allotrapianti. [74] Diversi studi hanno mostrato come la tecnica a DF sia vantaggiosa nel ripristinare la stabilità del ginocchio anteriore e la stabilità rotazionale rispetto alla tecnica SF. [75] Nel 2002, F.H. Fu arrivò alla conclusione che il singolo fascio non era in grado di far fronte alle forze in torsione e che quindi era necessario sviluppare nuove tecniche per ripristinare meglio le proprietà biomeccaniche del LCA nativo. [76] In un altro studio è stato dimostrato che la ricostruzione "anatomica" del LCA significa il ripristino delle dimensioni e delle inserzioni ossee originali, ma anche dell'orientamento delle fibre collagene del legamento nativo e che queste condizioni sono tutte contemporaneamente soddisfabili solo con tecnica a DF. [77] I dati disponibili, quindi, non sono sufficienti a definire quale sia la metodica migliore. Da uno studio, ad esempio, è emerso che non ci sono sostanziali differenze nei risultati ottenuti con

ricostruzione a DF con autograft di semitendinoso e gracile e con la ricostruzione a SF con il tendine del quadricipite. [78]

La posizione del neo-legamento all'interno del ginocchio è considerata fondamentale. [79] In particolare, è stato provato che la posizione del tunnel femorale è da considerarsi un parametro cruciale per il successo della ricostruzione del LCA. [80] Ad oggi, durante la ricostruzione del LCA a SF, vengono comunemente usati differenti approcci per eseguire il tunnel femorale:

- **Transtibiale:** Con il ginocchio flesso a 90°, viene realizzato un tunnel tibiale con un'inclinazione di circa 65-70° nel piano frontale e 45° nel piano sagittale, in modo da ottenere un orientamento adeguato e allineare l'impianto con il legamento nativo. Questo viene poi utilizzato per la creazione di quello femorale. La posizione ottimale del tunnel femorale è a "ore 11" per il ginocchio destro e a "ore 13" per il sinistro. [68] Questa tecnica, tuttavia, non permette di posizionare il legamento completamente sull'impronta anatomica femorale, ma con un orientamento più verticale a causa dei vincoli anatomici del tunnel tibiale. [81] Sulla base di questi studi biomeccanici e clinici iniziali, è stata proposta la "ricostruzione anatomica del LCA" con un'impronta femorale centrale del LCA al fine di migliorare la stabilità rotatoria del ginocchio e ridurre l'osteoartrite post-ricostruzione del LCA.



Figura 31 Tunnel eseguito con tecnica transtibiale [82]

- **Transportale o antero-mediale:** con ginocchio flesso a poco meno di 90° viene realizzato il tunnel femorale mediante accesso artroscopico anteromediale. Viene inserito e stabilizzato un filo guida sulla superficie mediale del condilo femorale laterale, 5-6 mm al davanti della posizione over the top. Dopodiché, il ginocchio viene flesso a circa 130° e il filo guida viene condotto fino alla corticale del condilo esterno, in modo tale che il foro di uscita si trovi poco al di sopra della radice del condilo femorale. Lungo i due fili guida, femorale e tibiale, attraverso delle frese, vengono realizzati i due rispettivi tunnel ossei. Viene, dunque, inserito il l'innesto e si procede al fissaggio mediante cambre in titanio o viti a interferenza. Il vantaggio di questa metodica risiede nell'indipendenza del tunnel femorale da quello tibiale ed è, inoltre, più semplice originare il tunnel femorale nell'area di inserzione nativa. In questa tecnica si mantiene un'indipendenza tra i due tunnel che può portare più facilmente a danni iatrogeni e cartilaginei durante la realizzazione del tunnel femorale, a causa anche della difficoltà nella tenuta dell'iperflessione dell'articolazione. Un altro svantaggio risiede nella difficoltà di visualizzare

correttamente l'impronta femorale nell'iperflessione a causa della scarsa visibilità. [68]

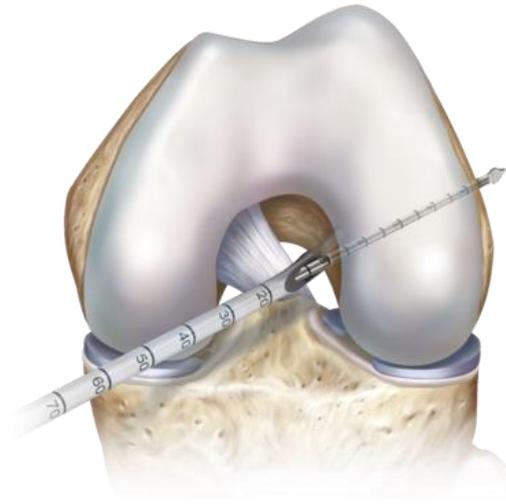


Figura 32 Tunnel eseguito con tecnica antero-mediale [82]

- Outside-In (OI): come la tecnica trasportale, permette una ricostruzione del LCA anatomica e la creazione di un tunnel femorale indipendente, ovvero non transtibiale. [83] Le tecniche indipendenti sono state sviluppate per ottenere dei tunnel femorali più accurati indipendentemente dai tunnel tibiali. L'orientamento del tunnel femorale diventa più obliquo sul piano frontale rispetto a quello ottenuto con la tecnica TT con il vantaggio di prevenire la traslazione anteriore e la rotazione interna della tibia. Specificatamente, secondo lo studio di Monaco et al., il tunnel femorale generato con la tecnica OI si presenta con un posizionamento di circa 20° più obliquo sul piano frontale, paragonato a quello ottenuto con la tecnica TT. [84]
- All-inside (AIT): si ha un approccio diverso dagli altri in quanto si utilizzano “socket” o “halfunnel” sia sulla parte tibiale sia su quella femorale. [85] Questa tecnica permette di evitare la creazione di tunnel completi, che comportano la

rottura delle corticali, consentendo di inserire l'innesto in due half-tunnel, creati utilizzando il Flipcutter Guide Pin.



Figura 33 Flipcutter® III Drill [83]

Questo strumento funge inizialmente da filo guida, che viene inserito con la tecnica OI a ginocchio posto a circa 80-90° di flessione: viene inserito nella tibia 2 cm medialmente al tubercolo tibiale; il punto di accesso nel femore si trova 2 cm prossimalmente e 1 cm anteriormente all'epicondilo femorale laterale. A questo punto, lo strumento si trasforma in Retro-drill e si procede alla creazione dei due half-tunnel, lunghi circa 25-30 mm, attraverso una fresatura manuale di tipo in-out. L'innesto viene quindi inserito attraverso il portale artroscopico antero-mediale, fatto passare nel tunnel femorale e infine fissato sul femore con Endobutton® o viti Trans-Fix®; viene poi trascinato nel tunnel tibiale, tensionato e fissato con una vite metallica a interferenza o con Cobra LFD. [68] I benefici di questa tecnica includono: ridotta incidenza

delle complicazioni, come la frattura del piatto tibiale; posizionamento più anatomico del tunnel tibiale; migliore integrazione innesto-osso; migliore cosmesi; maggiore conservazione post-operatoria di muscoli, tendini e ossa; miglioramenti della funzione a lungo termine; [85] maggior mantenimento dell'integrità della corticale a livello del condilo laterale; riduzione del dolore post-operatorio; possibilità di eventuale reimpianto trasformando gli halftunnel in tunnel completi. [68]

3.3 Sistemi di fissazione

Una volta posizionato l'innesto nella configurazione voluta, esso viene fissato con apposite viti o cambre. [86] Nella ricostruzione del LCA, la fissazione dell'innesto influisce sulla stabilità e sulla guarigione della struttura. Gli impianti di prima generazione di poli (acido L-lattico) (PLLA) biorassorbibili, ad esempio, hanno portato alla formazione di cisti e una mancata crescita ossea. [87] Una fissazione forte e rigida, invece, può prevenire lo slittamento o il fallimento dell'innesto prima che si sia verificata la fissazione biologica. [88] La conoscenza del tipo di impianti utilizzati per la fissazione dell'innesto può facilitare una futura revisione e il monitoraggio di problemi che potrebbero svilupparsi nel tempo. Il tipo di fissazione dell'innesto si basa sulla posizione (femorale o tibiale), sul tipo (cross-pin, interferenza o sospensiva) e sul materiale di fissazione (polimero bioassorbibile di prima generazione, biocomposito [bioassorbibile ma comprendente idrossiapatite o tricalcio fosfato], polimero biostabile [polietereterchetone o PEEK] o metallo). [87]

La fissazione rappresenta, dunque, un passaggio critico, date, inoltre, le proprietà meccaniche non ancora ottimali dei mezzi di fissazione. In particolare, la difficoltà è nell'assicurare quell'adeguata rigidità che ripristinerebbe la normale risposta cinematica dell'articolazione in condizioni di carico e che limiterebbe i movimenti del graft all'interno del tunnel. I sistemi di fissazione femorali possono essere così suddivisi:

- Fissazione in compressione tramite l'utilizzo di viti ad interferenza, che possono essere riassorbibili o metalliche. La tenuta di questo sistema dipende dalla densità ossea, dal diametro (direttamente proporzionale alla forza di fissazione), dalla direzione di inserimento, dalla lunghezza, dal materiale e dal design della vite stessa. Il vantaggio di questo sistema è che consente di fissare il neo-legamento in modo anatomico nei pressi della linea articolare, aumentando la stabilità e migliorando l'isometria dell'impianto. [89]

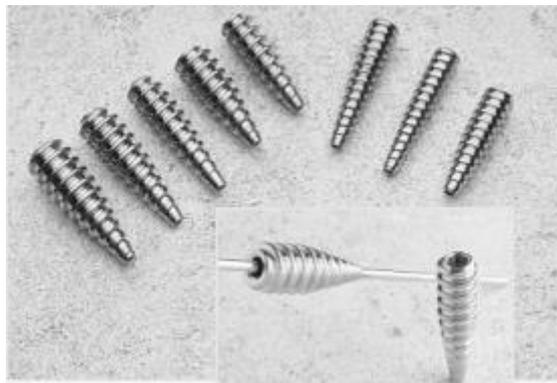


Figura 34 Viti ad interferenza [88]

- Fissazione ad espansione o a dilatazione tramite uno o più pin (chiodini che vengono inseriti in modo perpendicolare all'asse dei tunnel ossei [90] che penetrano trasversalmente nel tunnel femorale fino ad arrivare il graft provocandone un rigonfiamento. Questo sistema di fissazione dipende dall'iniziale press-fit del trapianto, dalla densità ossea e dal corretto posizionamento dei pin. Questa tecnica, di facile revisione e riproducibilità, permette una buona integrazione biologica ed evita la presenza di materiale estraneo nel tunnel. Ne è un esempio il sistema Rigidfix®. [89]

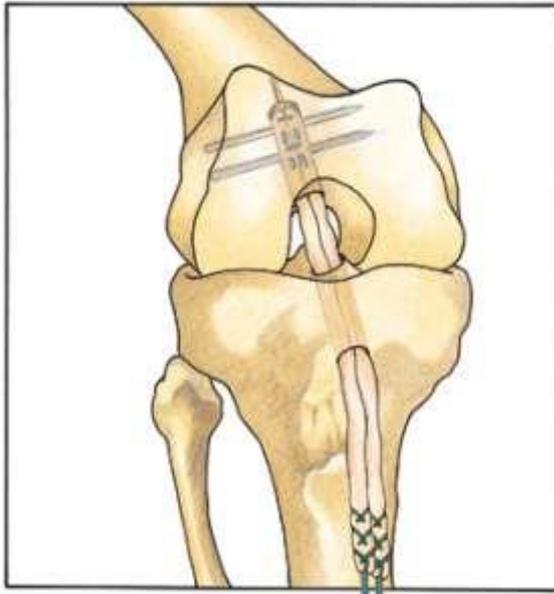


Figura 35 sistema Rigidfix® [91]

- Fissazione a sospensione, suddivisa in:
 - Sospensione corticale tramite l'utilizzo di materiali come suture o nastri di poliestere, collegati a bottoni (Endobutton®) o sistemi completamente metallici (Swing Bridge®). Questi mezzi di fissazione sono poggiati sulla corticale antero-laterale del femore al di fuori del tunnel osseo e mantengono il trapianto sospeso nel tunnel.

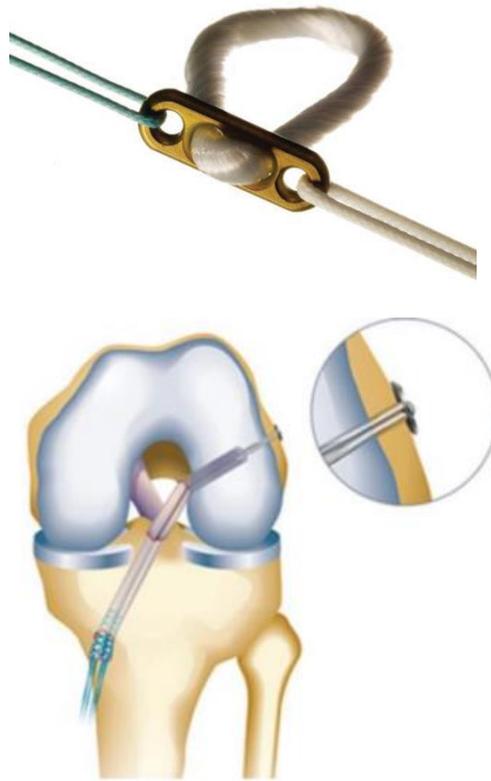


Figura 36 Endobutton® [91] [92]

- Sospensione spongiosa tramite una vite fissata nell'osso spongioso della metafisi femorale. Esempio: sistema Linx-HT®.

- Sospensione cortico-spongiosa transcondiloidea tramite un sistema ortogonale al tunnel ed al graft. La fissazione, quindi, è ortogonale rispetto alle linee di trazione e così il carico viene distribuito lungo l'interfaccia tra l'osso ed il mezzo. Le proprietà meccaniche di questo sistema dipendono sia dalla densità ossea che dalla lunghezza dei bracci di leva rispetto al punto sospensione del graft. Esempio: sistema Transfix®. [89]



Figura 37 sistema Transfix® [92]

Per quanto riguarda, invece, i sistemi di fissazione tibiale, essi si dividono in:

- sistemi a compressione: viti ad interferenza riassorbibili e metalliche;
- sistemi ad ancoraggio corticale: cambre.

Le viti ad interferenza si presentano come il sistema meccanicamente più sicuro. [93]
Le cambre metalliche hanno una struttura a ponte, simile a quella delle graffette. La cambra viene posizionata sopra al neo-legamento, bloccato nel momento in cui si inserisce la cambra nell'osso mediante un martello. [68] Utilizzando una sola cambra le proprietà biomeccaniche non sono ottimali, ma lo diventano utilizzandone due. [89] I materiali più utilizzati sono acciaio o titanio, la forma può essere a versione retta (90°) o angolata (26°), la sezione può essere quadra, curva o liscia e la punta è autoperforante. [68] Lo svantaggio di questo mezzo è che realizza una fissazione lontana dalla linea articolare e che, sporgendo dall'osso, potrebbe causare un'irritazione. [89]

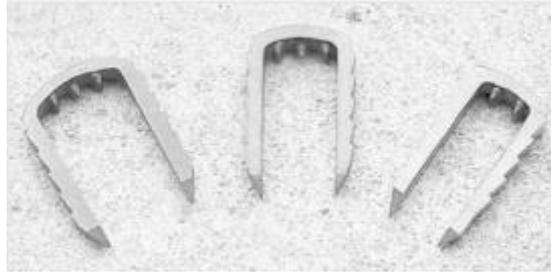


Figura 38 Cambre [88]

Diversi studi hanno comparato i sistemi di fissazione tibiale dimostrando che i sistemi ad ancoraggio bicorticale sono quelli meccanicamente più idonei e con minor slittamento. [94] La fissazione anatomica a compressione può non essere sufficiente poiché possiede scarsa resistenza meccanica, è troppo legata alla qualità dell'osso spongioso e determina alti valori di scivolamento. [95] Certamente, i sistemi ad ancoraggio corticale o meglio bicorticale sono meccanicamente più idonei e determinano un minor slittamento; Esistono alcuni studi, tuttavia, che dimostrano la possibilità di migliorare la guarigione nei siti di fissazione delle viti ad interferenza riassorbibili, ora anche disponibili con l'associazione del PLLA con il Trifosfato Calcico o Idrossiapatite con un aumento delle loro capacità osteoinducente. [96] È per questi motivi, meccanici e biologici, che attualmente si preferisce una fissazione bicorticale combinata con quella a compressione in posizione anatomica con viti composte anche di HA o TFC (doppia fissazione). [93]

3.4 Tensionamento

Successivamente alla creazione dei tunnel ossei, del posizionamento e della fissazione dell'innesto, si applica all'innesto una determinata tensione. Questa è fondamentale poiché influenza l'esito della ricostruzione del LCA dato che lo stimolo meccanico è molto importante per il corretto orientamento delle fibre di collagene neoformate durante la fase di rimodellamento dell'innesto stesso. Il tensionamento, in maniera adeguata, permette di ottenere una valida stabilità articolare, mentre potrebbero verificarsi delle complicanze e dei fallimenti in caso di tensionamento eccessivo od

insufficiente. In particolare, una tensione insufficiente provocherebbe una lassità anteriore, mentre un'eccessiva tensione potrebbe provocare: deficit del ROM, fallimento della fissazione, deformazione plastica ed allungamento dell'innesto, rottura e danno biologico (degenerazione, mancata incorporazione) dell'innesto. [93] [97]



Figura 39 Applicazione di una tensione all'innesto [98]

In uno studio condotto da Tohyama e Yasuda [98] è stato mostrato come tensione iniziale fosse uno dei fattori significativi per i risultati della ricostruzione del LCA. La tensione ottimale dell'innesto, però, non è stata ancora determinata in modo univoco e in letteratura i vari autori hanno proposto nel corso degli anni valori di tensione tra i 20 N e i 70 N, preferendo però in generale le basse tensioni (30-40 N). [93]

Nella tecnica double-bundle i due fasci dell'innesto, che agiscono in momenti diversi della flessione, devono essere tensionati con l'articolazione in due configurazioni angolari differenti: il fascio postero-laterale si tende tra i 30° e gli 0° e raggiunge la massima tensione in iperestensione, mentre il fascio antero-mediale si tende tra i 45° e i 60°. Nella tecnica single-bundle, invece, il tensionamento avviene tra 10° e 20°. [68] Ad esempio, nello studio condotto da Koga et al. [99] si è cercato di determinare la tensione minima iniziale necessaria per ripristinare la stabilità del ginocchio, con una ricostruzione del legamento crociato anteriore a doppio fascio in vivo con un

tendine semitendinoso autologo. I fasci sono stati fissati ad un sistema di tensionamento dell'innesto durante l'intervento chirurgico e le tensioni iniziali dell'innesto sono state impostate a 30 N, 25 N e 20 N. La tensione del fascio è stata registrata durante la flessione-estensione del ginocchio e in risposta a carichi rotatori, misurando inoltre la lassità del ginocchio tramite pivot shift test. Il valore scelto come ottimale è stato 25 N. Una volta stabilita la tensione ottimale a cui si vuole tendere il neo-legamento, bisogna assicurarsi che essa venga mantenuta anche in seguito alla fissazione finale sulla tibia. Mae et al. [100] hanno studiato quanto efficacemente la tensione dell'innesto predeterminata viene mantenuta dopo la fissazione finale dell'innesto alla tibia utilizzando un sistema di tensionamento, chiamato stivale, fissato al polpaccio con una benda e monitorando la tensione dell'innesto. Lo stivale di tensionamento dell'innesto (graft tensioning boot) è costituito da un telaio con una chiave dinamometrica [101] : in questo studio otto gambe di cadavere sono state sottoposte alla ricostruzione anatomica del LCA con la tecnica a doppio fascio (double-bundle). Sulla corticale femorale laterale, accanto al tunnel femorale, sono stati installati due dinamometri, a cui sono stati collegati i fili di sutura attraverso l'Endobutton®. Successivamente, dopo aver applicato ripetutamente il carico massimo agli innesti per 3 minuti, questi sono stati fissati alla tibia, flessa a 20°, a 10 N o a 20 N utilizzando tre differenti tecniche di tensionamento: tensionamento manuale, tecnica dello stivale di tensionamento con movimento di flessione-estensione (TB-FE: tensioning boot technique with flexion-extension motion) e tecnica dello scarpone con tiro ripetuto (TB-RP: tensioning boot technique with repetitive pull). La tensione residua è stata misurata a 20° di flessione sia dopo 3 minuti dalla fissazione degli innesti che dopo 10 e 50 movimenti ripetuti di flessione-estensione. I risultati hanno mostrato delle differenze significative tra le tecniche e che, in particolare, la TB-RP è la tecnica di tensionamento più sicura per mantenere la tensione dell'innesto più vicina alla tensione iniziale prevista nella ricostruzione del LCA. [100]

Un ulteriore aspetto da considerare è l'effetto della tensione iniziale dell'innesto sull'allargamento del tunnel femorale. Nello studio di Taketomi et al. l'allargamento del tunnel femorale è stato valutato tramite tomografia computerizzata TC 3D ed è

stato calcolato come variazione percentuale dell'area dell'apertura del tunnel. I risultati hanno mostrato che valori elevati di tensione iniziale hanno determinato un maggiore allargamento dell'apertura del tunnel femorale; tali valori, però, non hanno comunque influenzato il risultato clinico. [102]

3.5 Fallimento della ricostruzione

Il fallimento della ricostruzione del LCA avviene nel 10-20% circa dei casi. Il numero dei soggetti che potrebbero necessitare di un intervento di revisione è molto elevato: negli Stati Uniti si verificano circa 60000 fallimenti dell'innesto ogni anno [103], in Italia 2.500. [104] Le cause principali sono:

- Errori di tecnica chirurgica: costituiscono la causa principale che porta al fallimento della ricostruzione. Il fallimento, che può essere precoce o tardivo, può essere determinato da una tecnica non adeguata o non eseguita in modo corretto. In particolare, l'errore più frequente è nel posizionamento dei tunnel ossei, determinando un'usura precoce del neo-legamento. Il conflitto meccanico del trapianto, l'impingement, rappresenta un problema sia quando è associato ad un posizionamento dei tunnel ossei non corretto sia da solo, quando la gola non è stata lavorata adeguatamente dal punto di vista plastico. Un'altra possibile causa di fallimento precoce è l'insufficiente pretensionamento del neo-legamento, poiché questo determina una perdita di tensione dell'innesto dopo la sua fissazione a causa della fisiologica elongazione. Altri possibili errori e imprevisti non riguardano direttamente la tecnica chirurgica in sé, ma in particolare l'uso di un innesto con proprietà meccaniche non ottimali (ad esempio, tendini di scarso calibro o lunghezza, brattea ossea di piccole dimensioni e distacco della brattea stessa dalla porzione tendinea).

- Fallimento biologico: è il caso meno frequente. Le proprietà biologiche del tessuto trapiantato potrebbero variare nel tempo a causa di stress meccanici dovuti a programmi di fisiochinesiterapia (FKT) troppo aggressivi oppure a problemi di osteointegrazione, che è ostacolata dalla diversità di diametro tra tunnel e trapianto o dall'uso di mezzi di ancoraggio troppo grandi. Altri due casi rari, ma possibili, sono l'avascolarità dei tessuti e la reazione immunologica verso un eventuale allograft.
- Fallimento biomeccanico: può avvenire come conseguenza di un nuovo trauma ad alta energia o di una riabilitazione inadeguata e troppo aggressiva.

Nel caso di fallimento dell'impianto per una delle possibili cause sopra citate, è possibile sottoporsi ad un intervento di revisione per recuperare la stabilità articolare. La chirurgia di revisione deve essere pianificata nel dettaglio poiché si va a lavorare su una zona già operata, quindi bisogna far fronte a divari anatomici e tissutali dovuti al primo intervento. [104] In particolare, bisogna valutare con attenzione la presenza di [104]:

- Lesioni dei legamenti collaterali, dei menischi e della cartilagine.
- Mezzi di fissazione precedenti, che possono influenzare la tecnica per la loro posizione o per la presenza di divari ossei.
- Deficit ossei da colmare. Bisogna valutare la loro estensione per capire se sia possibile colmarli durante la nuova ricostruzione o se sia opportuno eseguire un primo intervento di trapianto osseo per poi completare, dopo almeno sei mesi, la ricostruzione del LCA.

Il tipo di impianto da inserire durante l'intervento di revisione deve essere scelto sulla base delle cause che hanno portato al fallimento della prima ricostruzione e della tecnica seguita in quell'occasione. Così come nel primo impianto, anche nel caso della revisione la riabilitazione ha un'importanza fondamentale: la fisioterapia

deve evitare iper-sollecitazioni del trapianto e deve essere programmata in base al tipo di trapianto utilizzato. In genere la fisioterapia dopo la revisione viene strutturata con una frequenza meno alta rispetto ai programmi riabilitativi dopo il primo impianto ed è opportuno pianificare controlli frequenti e regolari, specialmente durante i primi 6-10 mesi dall'intervento. Infine, è opportuno che la ripresa dell'attività sportiva sia graduale. [104]

Capitolo 4

Ricostruzione del modello 3D del ginocchio

Per la progettazione di una guida chirurgica patient specific è necessario disporre di un modello matematico delle parti di interesse del ginocchio. L'articolazione ottenuta in ambiente digitale permette, infatti, di effettuare misure e previsioni sulla realizzazione dei tunnel tibiale e femorale, punto focale di questo studio.

4.1 Segmentazione

Sono state acquisite delle immagini DICOM di una risonanza magnetica del ginocchio esteso di un soggetto con LCA lesionato. Queste immagini, sulle viste assiale, coronale e sagittale sono state poi importate nel programma Mimics Medical®.



Figura 40 Vista coronale della MRI

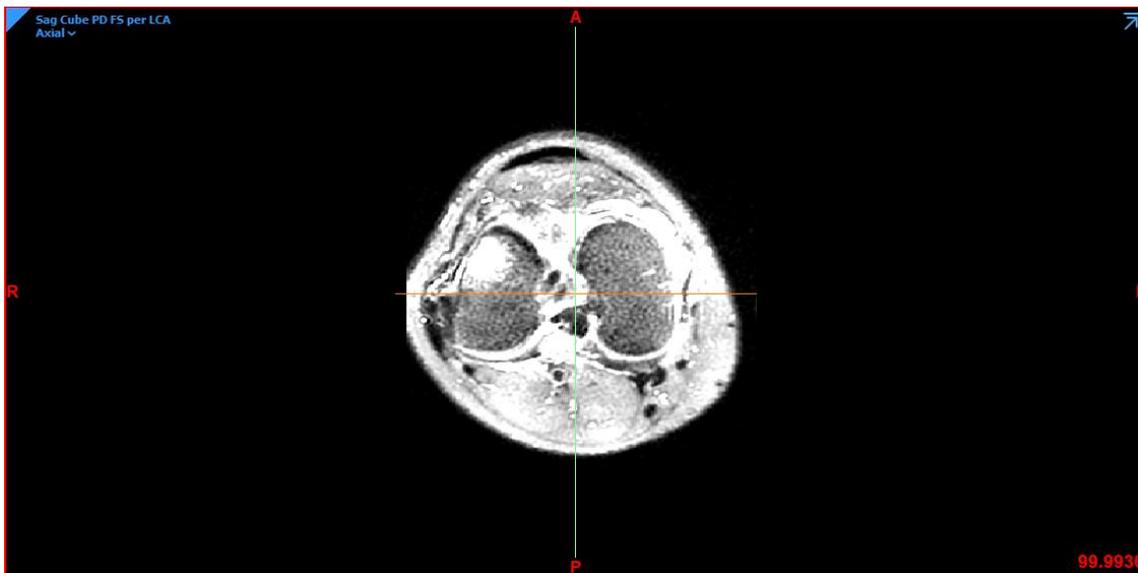


Figura 41 Vista assiale della MRI

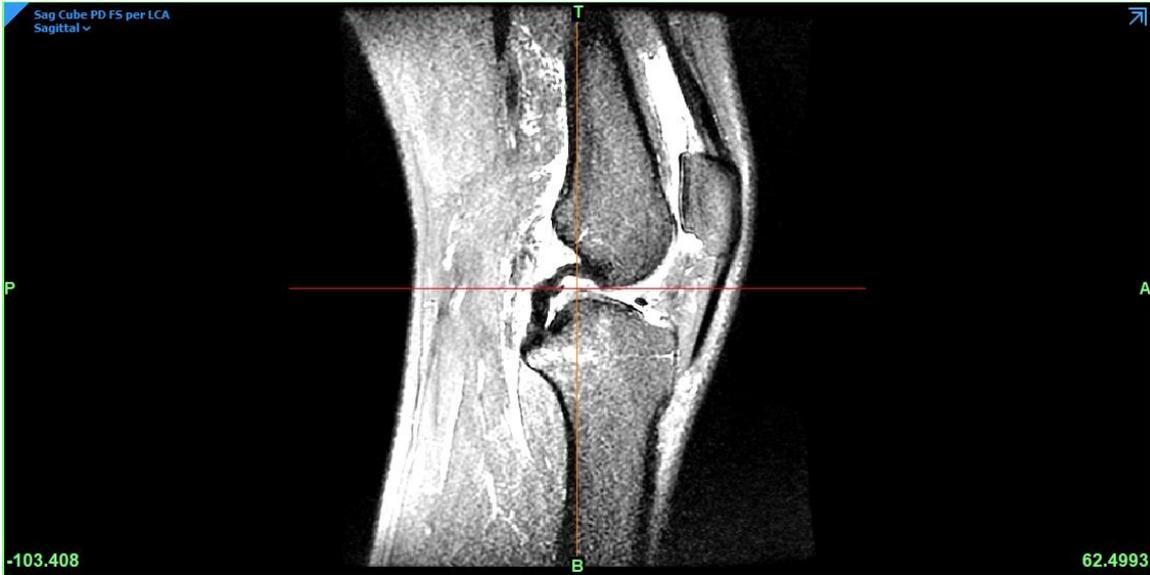


Figura 42 Vista sagittale della MRI

Le 252 immagini 2D sono rappresentate in scala di grigi, l'una sull'altra, a intervalli di 0,3906 mm. Ad ogni struttura è stata associata una maschera, cioè un filtro cromatico in grado di discretizzare i tessuti. Una volta definiti i contorni della struttura in esame, l'area interna è stata riempita con il rispettivo colore della maschera.

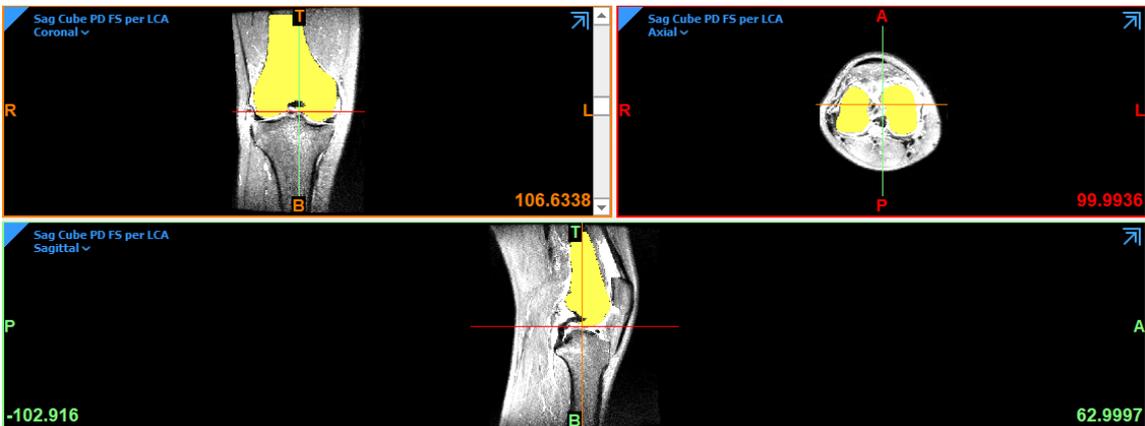


Figura 43 Maschera relativa al femore nelle tre viste

Questa procedura di segmentazione è stata effettuata per ogni fetta della risonanza, ottenendo una ricostruzione 3D della struttura di interesse.

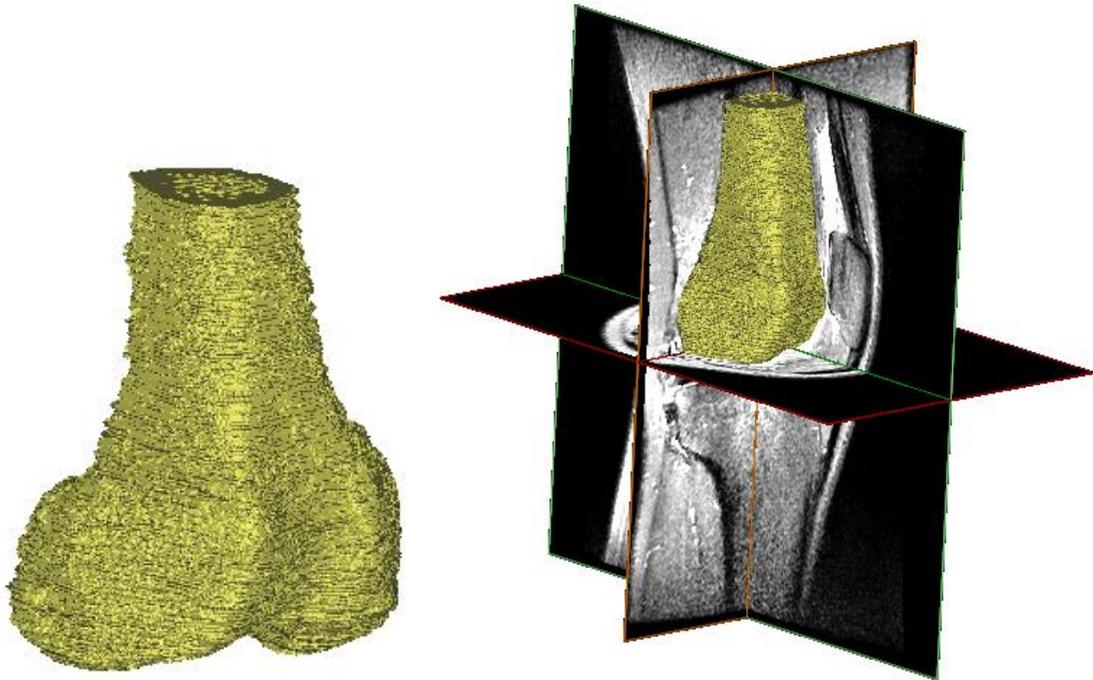


Figura 44 Ricostruzione 3D del femore

Ogni struttura presentava una diversa tonalità su scala di grigi e per poter identificare la porzione giusta di immagine su cui effettuare la segmentazione si è impostato un intervallo di “threshold” adeguato, cioè una soglia nella scala di grigi per poter differenziare i tessuti. Si è partiti con la ricostruzione delle strutture anatomiche di più facile individuazione: la parte ossea, cioè il femore, la tibia, il perone e la rotula, con un tono di grigio molto più scuro.

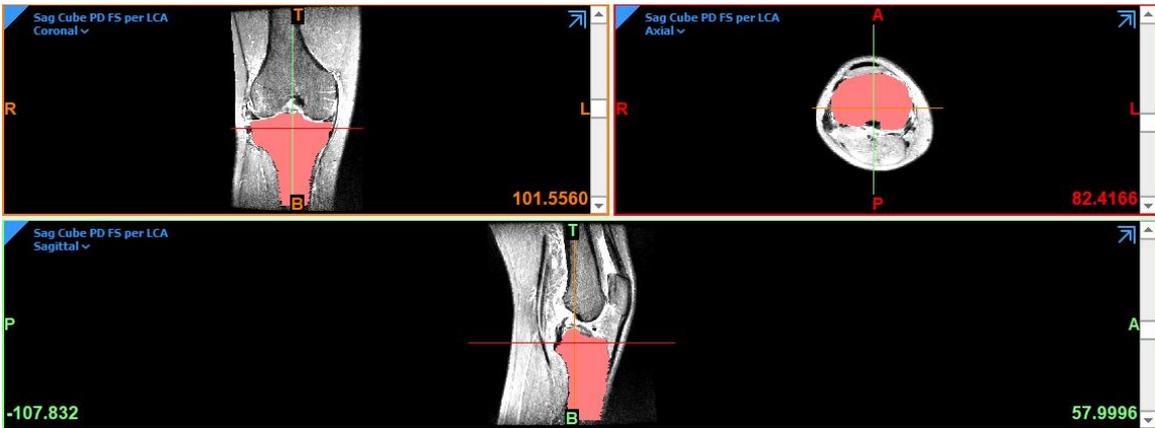


Figura 45 Maschera relativa alla tibia nelle tre viste

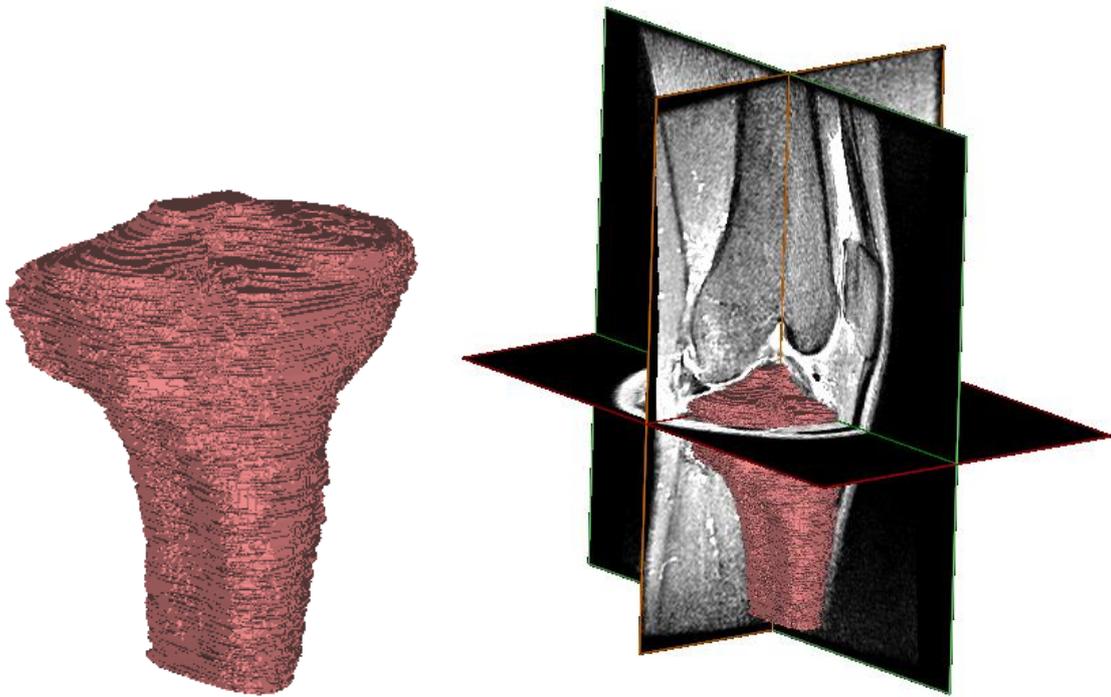


Figura 46 Ricostruzione 3D della tibia



Figura 47 Maschera relativa al perone nelle tre viste

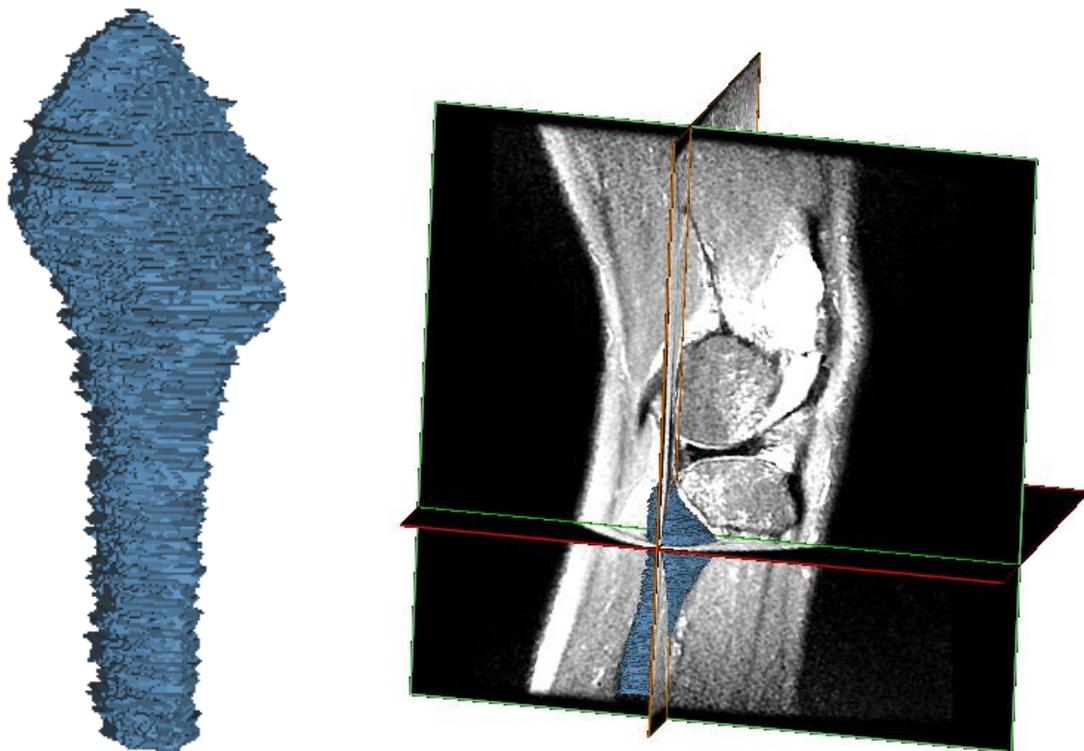


Figura 48 Ricostruzione 3D del perone

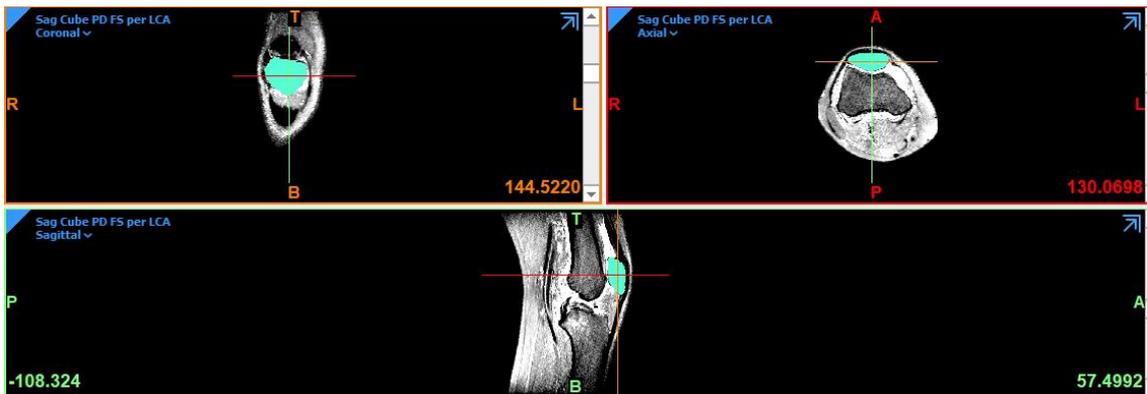


Figura 49 Maschera relativa alla rotula nelle tre viste

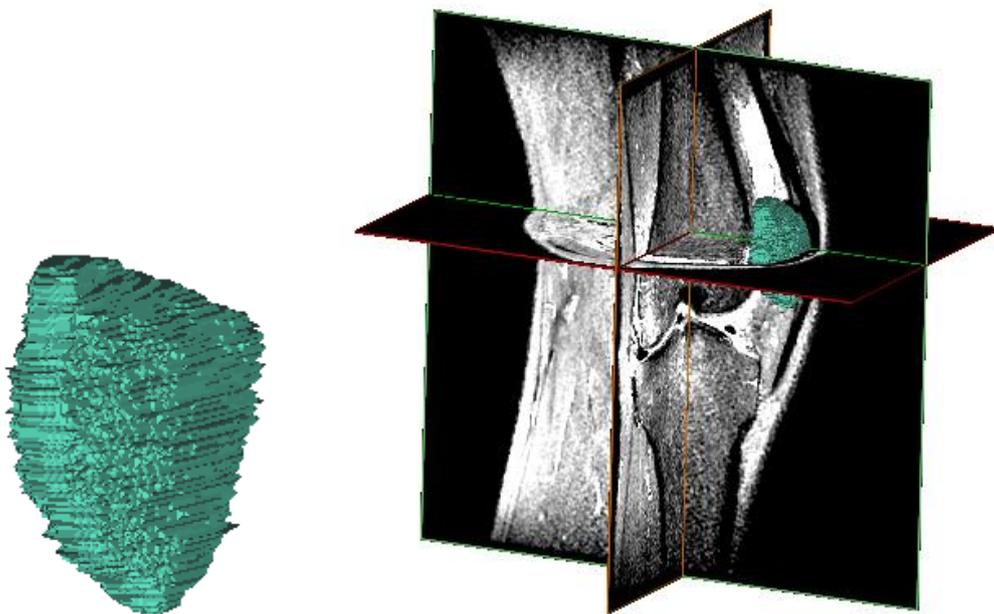


Figura 50 Ricostruzione 3D della rotula

Sono stati segmentati, poi, i menischi e i legamenti: crociato posteriore, collaterale mediale, collaterale laterale e rotuleo.

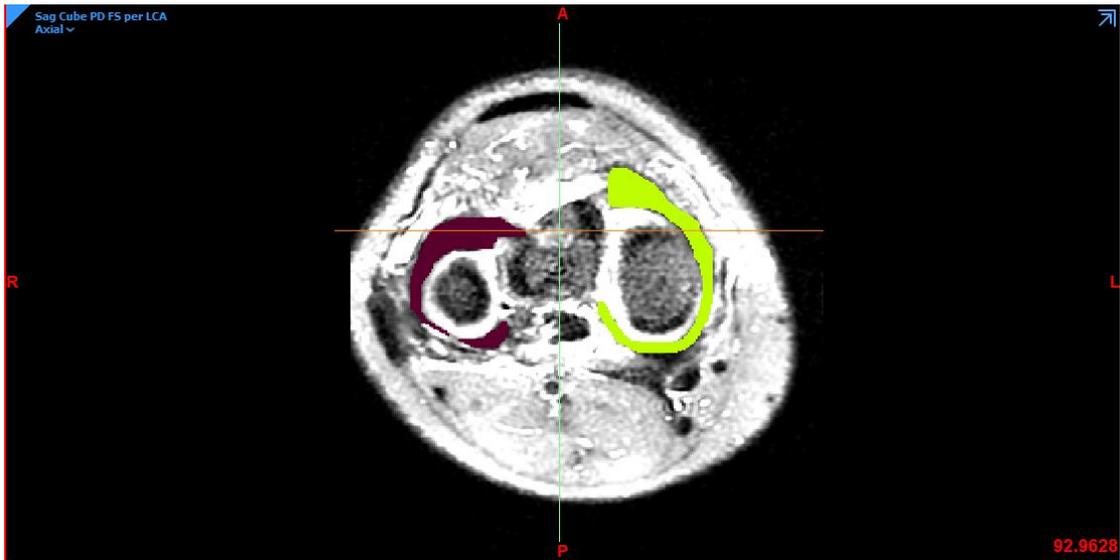


Figura 51 Maschere relative ai menischi nella vista assiale

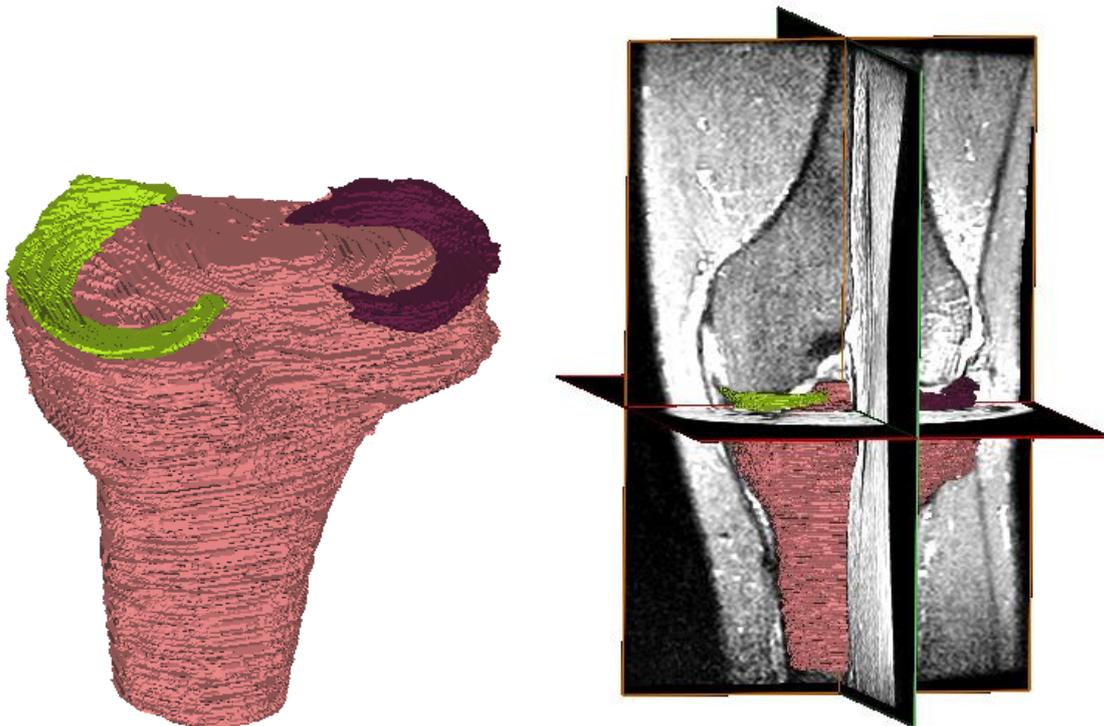


Figura 52 Ricostruzione 3D dei menischi

Dalle immagini di risonanza magnetica è emerso come il menisco laterale fosse lesionato ma ai fini di questa tesi questo aspetto è irrilevante. Perciò, è stata ricostruita la maschera relativa al menisco laterale supponendo che esso fosse continuo, senza

alcun danno, basandosi sulla letteratura e immagini, sempre ottenute mediante risonanza magnetica, di menischi sani.

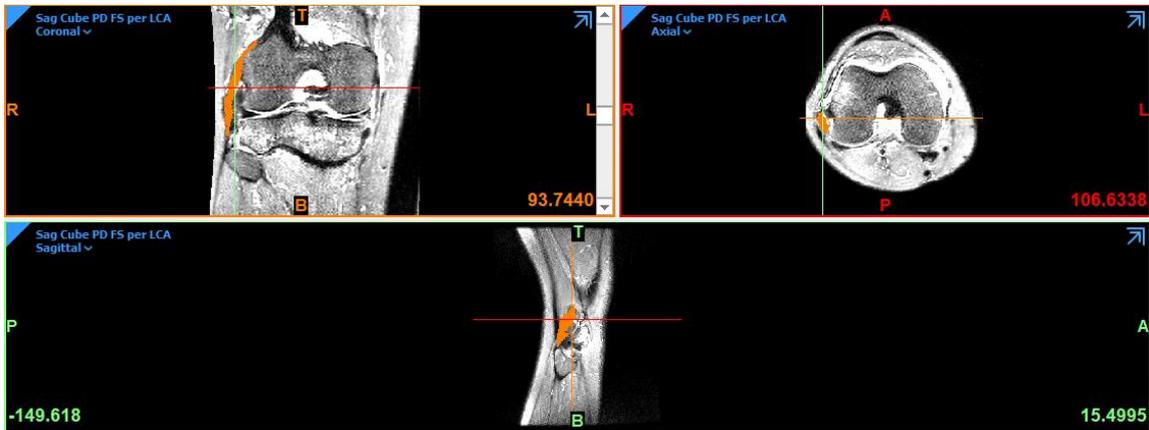


Figura 53 Maschera relativa al legamento collaterale laterale nelle tre viste

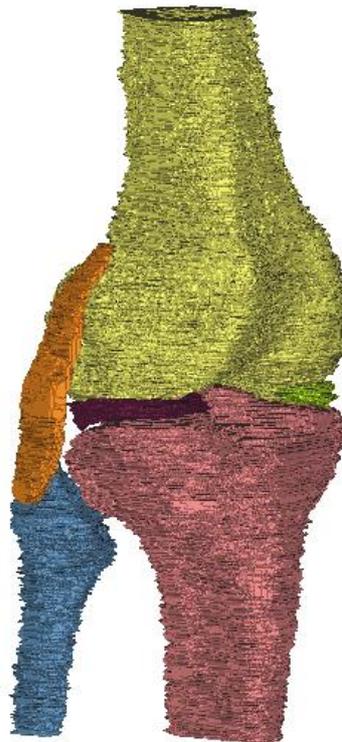


Figura 54 Ricostruzione 3D del legamento collaterale laterale

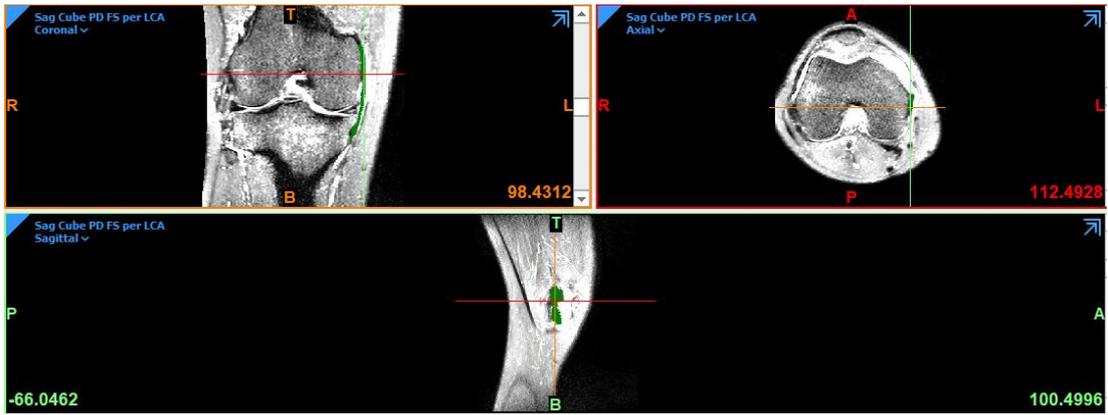


Figura 55 Maschera relativa al legamento collaterale mediale nelle tre viste

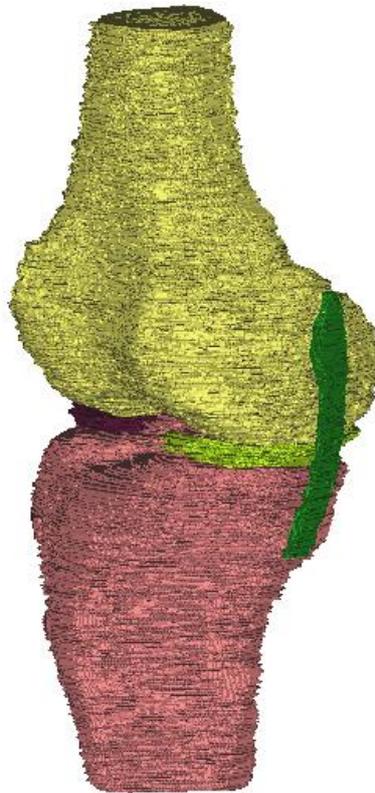


Figura 56 Ricostruzione 3D del legamento collaterale mediale

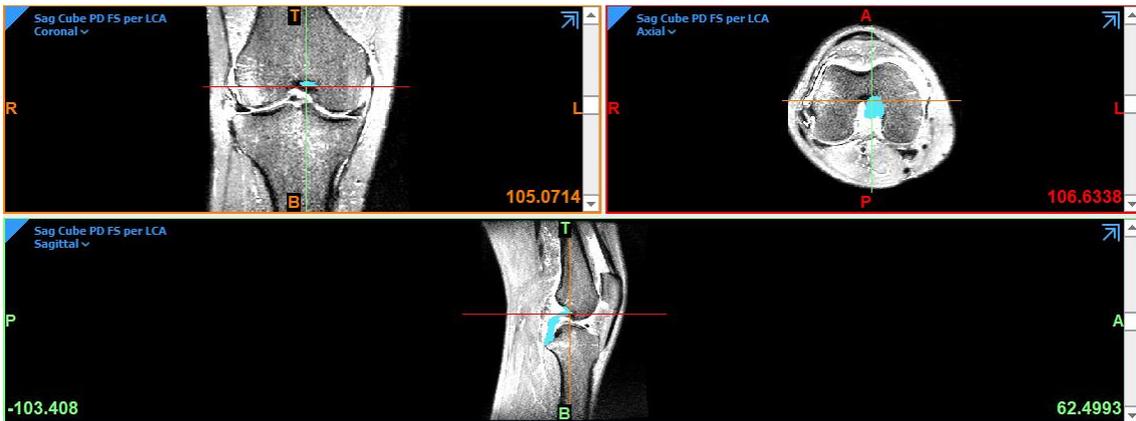


Figura 57 Maschera relativa al legamento crociato posteriore nelle tre viste

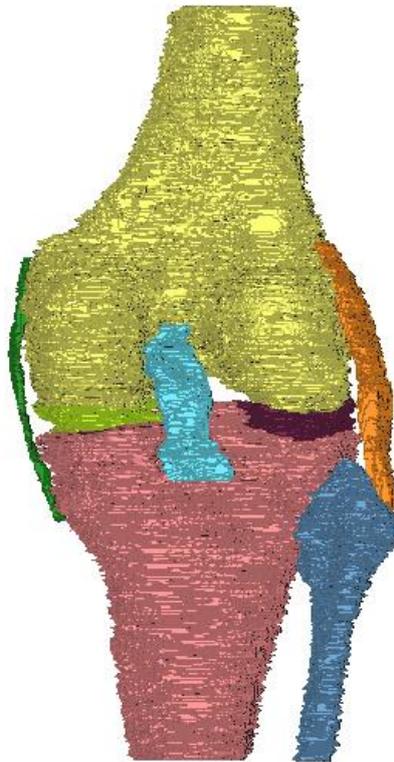


Figura 58 Ricostruzione 3D del legamento crociato posteriore

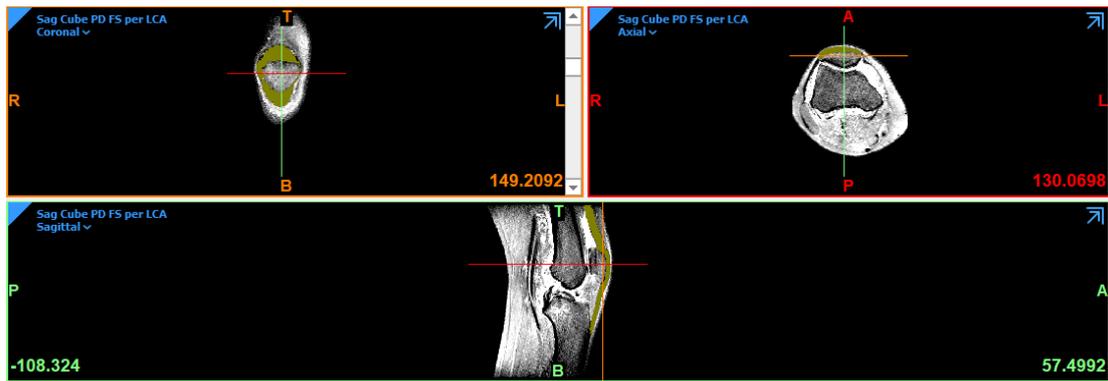


Figura 59 Maschera relativa al legamento rotuleo nelle tre viste

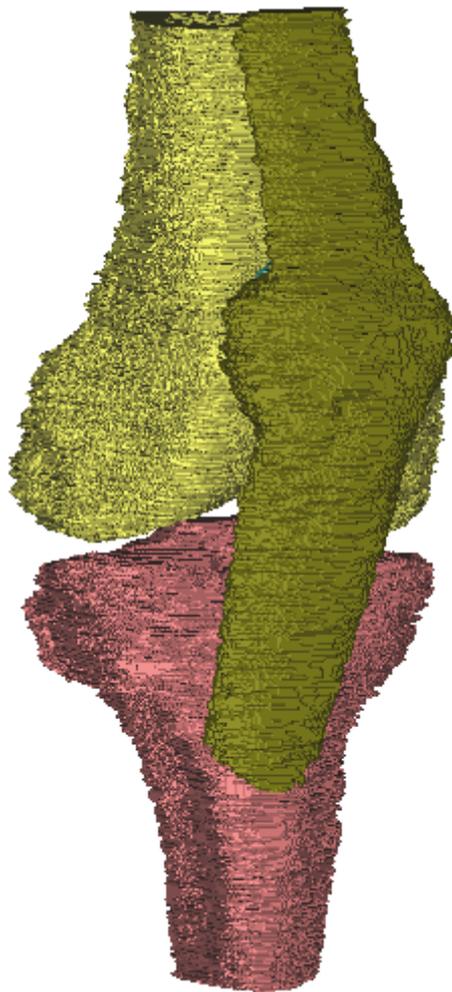


Figura 60 Ricostruzione 3D del legamento rotuleo

Infine sono state segmentate le strutture relative alle cartilagini (femorale, tibiale e rotulea) e al tessuto molle intorno all'articolazione.



Figura 61 Maschera relativa alla cartilagine femorale nelle tre viste

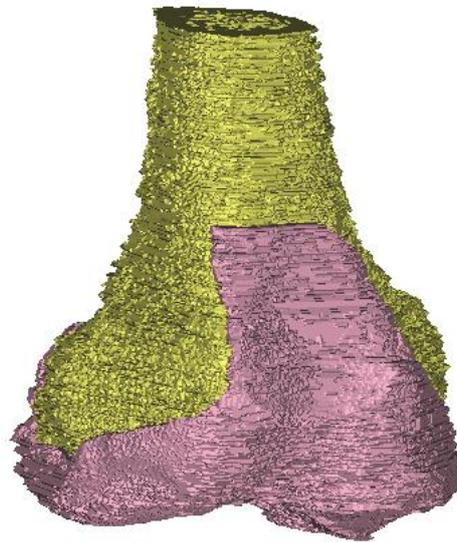


Figura 62 Ricostruzione 3D della cartilagine femorale



Figura 63 Maschera relativa alla cartilagine tibiale nelle tre viste

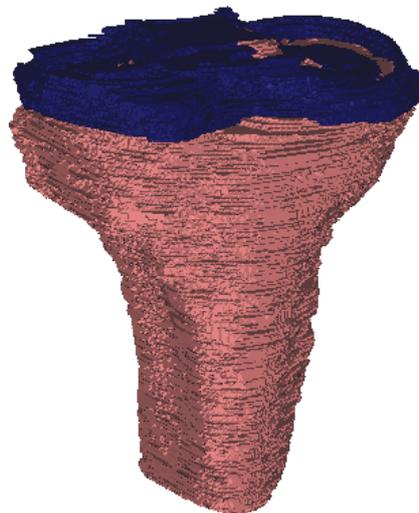


Figura 64 Ricostruzione 3D della cartilagine tibiale

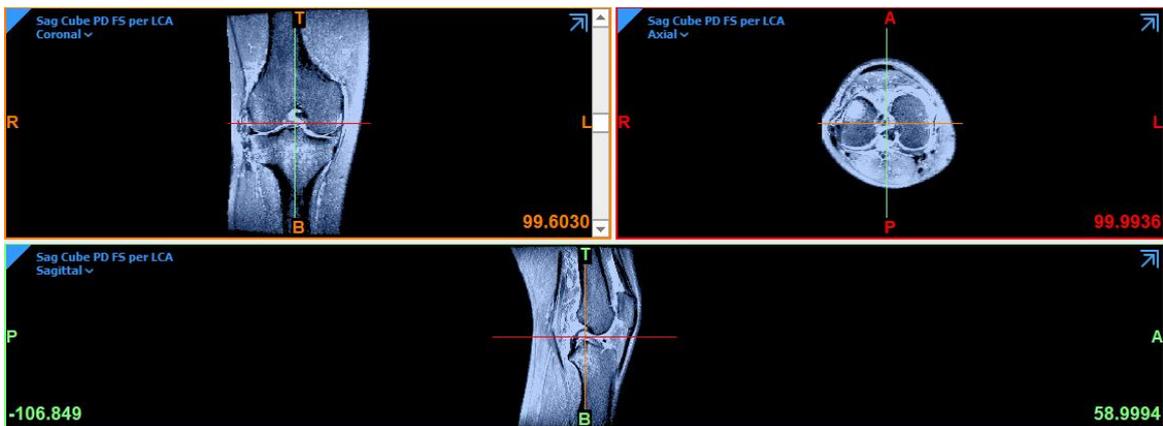


Figura 65 Maschera relativa al tessuto molle nelle tre viste

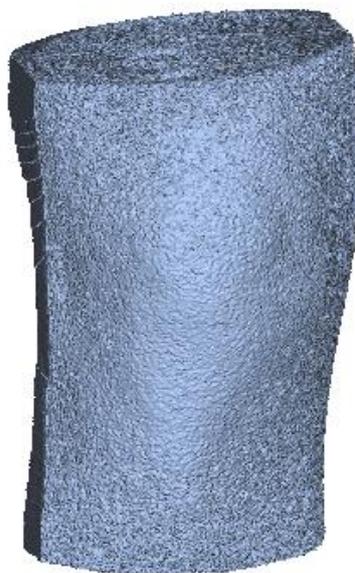


Figura 66 ricostruzione 3D del tessuto molle intorno all'articolazione del ginocchio

Nella seguente tabella sono riportati gli intervalli nella scala di grigi utilizzati per discretizzare le varie strutture segmentate.

Scala di Grigi (HU)

Struttura Anatomica	Soglia inferiore	Soglia superiore
Femore	302	718
Tibia	744	2508
Perone	744	2508
Rotula	1361	3642
Menisco mediale	1250	3642
Menisco laterale	1250	3642
Legamento crociato posteriore	1250	3642
Legamento collaterale laterale	1250	3642
Legamento collaterale mediale	1250	3642
Legamento rotuleo	1250	1348
Cartilagine femorale	1250	3642
Cartilagine tibiale	1250	3642
Cartilagine Rotulea	1311	3642
Tessuto molle	176	3642

Tabella 3 Soglie di threshold delle strutture anatomiche

La ricostruzione 3D ottenuta a questo punto si presenta come “grezza” e ricca di imperfezioni dovute alla segmentazione effettuata fetta per fetta a partire dalla risonanza magnetica (superfici non regolari, zone spigolose ecc.).

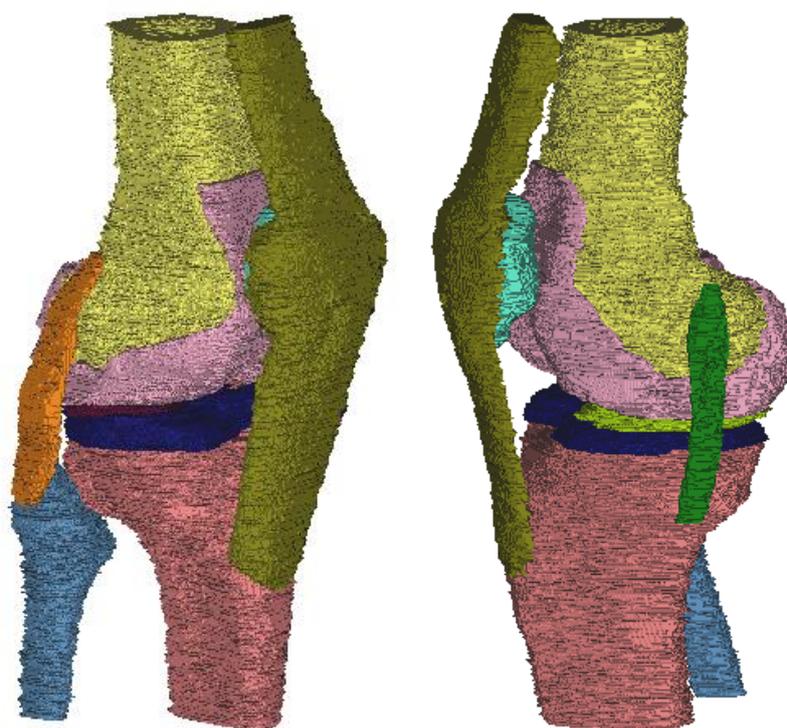


Figura 67 Modello 3D ottenuto con la segmentazione

Per questo motivo è stata eseguita una prima rifinitura superficiale, attraverso il comando “smooth mask”. Sono stati poi calcolati gli objects, a partire dalle maschere, eseguendo un’ulteriore smussatura prima di poter trasferire le varie strutture in un software per il post processing.

4.2 Post Processing

Il primo modello 3D ottenuto si presenta ancora con molte imperfezioni. Si notano, ad esempio, le scanalature nelle superfici dovute alla segmentazione effettuata per ogni fetta delle immagini di risonanza magnetica. La struttura è stata, dunque, importata nel software 3-Matic Medical® dove è iniziata una fase di post processing. Questo software ha permesso di correggere i diversi errori derivanti dall’ambiente di Mimics® con diverse opzioni di lavoro.

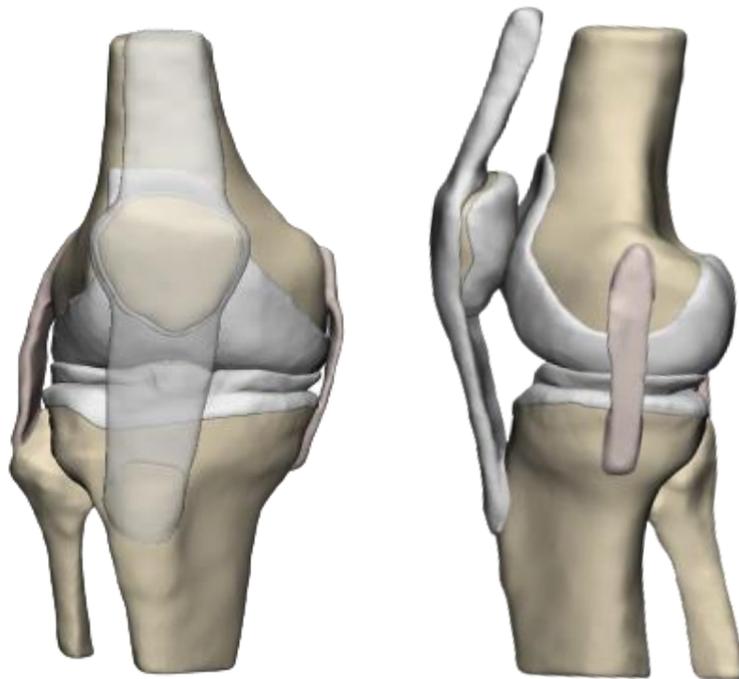


Figura 68 Modello 3D del ginocchio dopo la fase di post processing (viste frontale e sagittale)

Sono stati ridotti gli elementi triangolari in modo da alleggerire la struttura. Dopodiché, attraverso il comando “local smoothing” sono state regolarizzate le superfici delle varie strutture, andando a rimuovere eventuali cavità o porzioni di superficie in eccesso. Con questo software è stato, inoltre, possibile definire i punti di attacco tra i legamenti e la parte ossea dell’articolazione, creando un raccordo tra essi.



Figura 69 Modello 3D del ginocchio dopo la fase di post processing (vista isometrica)

Sono state poi definite le forme della cartilagine e dei menischi, correggendo le inserzioni e regolarizzando le forme. Il modello a questo punto si presenta come presentato in figura 70, dove il tessuto molle in trasparenza mostra l'articolazione del ginocchio ricostruita.



Figura 70 Modello 3D del ginocchio dopo la fase di post processing all'interno del tessuto molle

4.3 Orientamento del ginocchio

Una volta ricostruito il modello 3D del ginocchio è molto importante assicurarsi che mostri un orientamento corretto, cioè che si trovi esattamente in una posizione anatomica.

L'articolazione ottenuta dopo la ricostruzione mediante il software Mimics® si presentava su un piano sagittale e frontale differenti rispetto al caso standard anatomico. Per questo motivo, su 3-Matic®, è stata effettuata una rotazione oraria di 30° nel piano assiale in modo che tutti e tre i piani coincidessero.

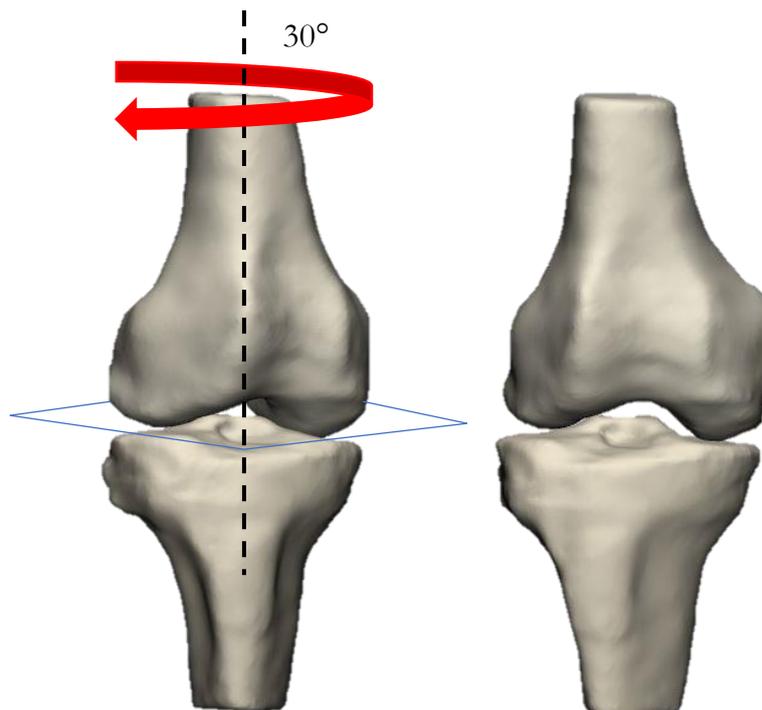


Figura 71 orientamento anatomico del ginocchio precedente (a sinistra) e corretto (a destra)

In seguito, per verificare che non ci fossero eventuali deformità, è stato confrontato l'allineamento del modello con dei parametri standard. Questi parametri sono angoli, perciò è stato analizzato l'orientamento del femore rispetto alla tibia.

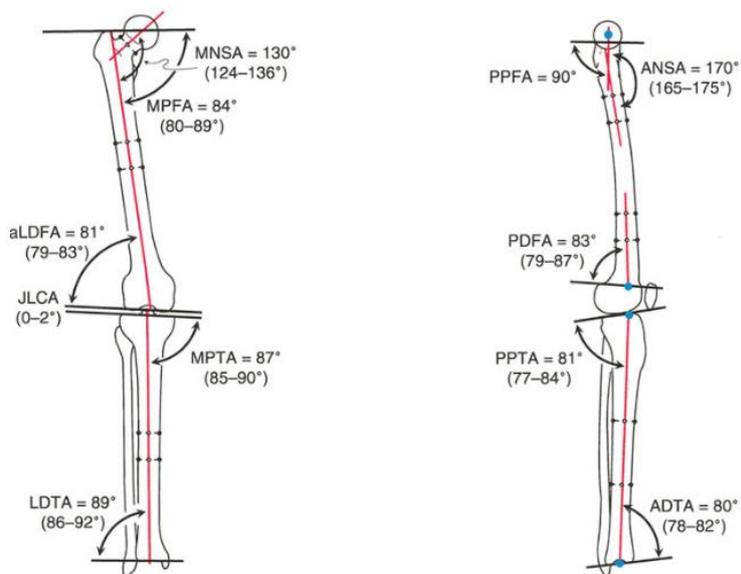


Figura 72 Orientamento normale dell'arto inferiore [105]

Si sarebbe ottenuto un confronto con la letteratura più accurato avendo anche le articolazioni di anca e caviglia, ma disponendo solo dell'articolazione del ginocchio ci si è avvalsi solo della relazione tra la parte distale del femore e la parte prossimale della tibia. Si noti comunque che l'errore commesso, in ogni caso, è ininfluenza ai fini di questo studio.

Innanzitutto, sono stati tracciati gli assi anatomici del femore e della tibia, definiti come una linea passante per il punto medio della diafisi ossea. Dopodiché, sono stati individuati gli assi relativi al piano tibiale e dei due condili femorali.

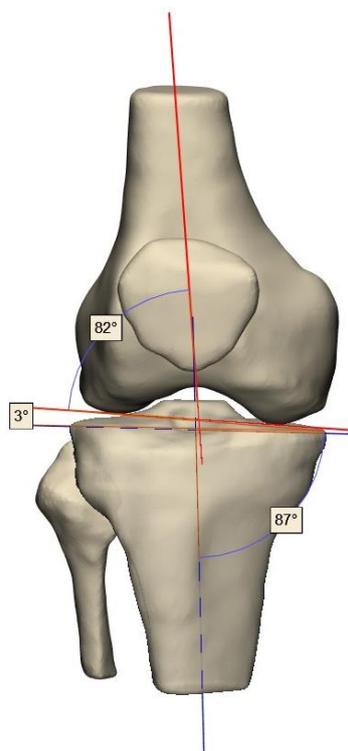


Figura 73 Angoli del ginocchio sul piano frontale

Perciò, sul piano frontale si ha:

- l'angolo tra l'asse anatomico del femore e l'asse dei condili, cioè l'angolo femorale laterale distale (LDFA), di 82° ;
- l'angolo tra l'asse anatomico della tibia e l'asse del piatto tibiale, cioè l'angolo tibiale prossimale mediale (MPTA), di 87° .

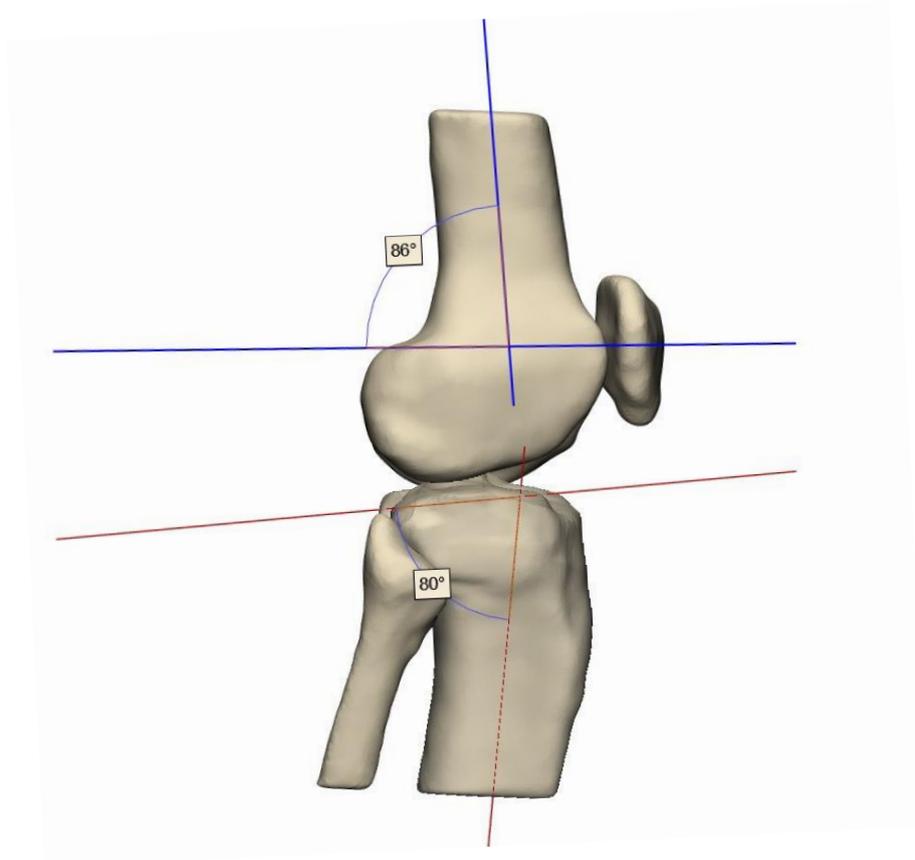


Figura 74 Angoli del ginocchio sul piano sagittale

Mentre, sul piano sagittale:

- l'angolo tra l'asse anatomico del femore e la linea di separazione tra i condili e la metafisi del femore, cioè l'angolo femorale posteriore distale (PDFA), di 86° ;
- l'angolo sul piano sagittale tra l'asse anatomico della tibia e la linea subcondrale del piatto tibiale, cioè l'angolo tibiale posteriore prossimale (PPTA), di 80° .

Nella seguente tabella viene riassunto il confronto tra i valori misurati e i range standard ottenuti dalla letteratura.

Angolo	Piano anatomico	Valore misurato	Range in letteratura
LDFA	Frontale	82°	79-83°
MPTA	Frontale	87°	85-90°
PDFA	Sagittale	86°	79-87°
PPTA	Sagittale	80°	77-84°

Tabella 4 Confronto angoli misurati e intervalli standard ricavati dalla letteratura

Si può notare come tutti gli angoli rientrino all'interno degli intervalli di normalità.

4.4 Flessione del modello a 90°

Per poter progettare la guida chirurgica è necessario che l'articolazione si trovi in una configurazione consona ai canoni seguiti da un tipico intervento di ricostruzione del legamento crociato anteriore. Ad esempio, la tecnica di ricostruzione All-Inside, come descritto in precedenza, prevede un ginocchio flesso a 90° in modo da poter realizzare i tunnel ossei con un orientamento corretto. Per questo motivo, il passo successivo di questo studio consiste nella flessione del modello a 90°, supponendo venga utilizzata la tecnica sopra citata.

Per disporre l'articolazione in questa configurazione non è sufficiente una semplice rotazione del femore sulla tibia. Il movimento di flesso-estensione del ginocchio, infatti, è costituito da due componenti principali: rotolamento e spostamento, in cui il centro di rotazione istantaneo è variabile a causa anche dell'asimmetria tra i due condili femorali.

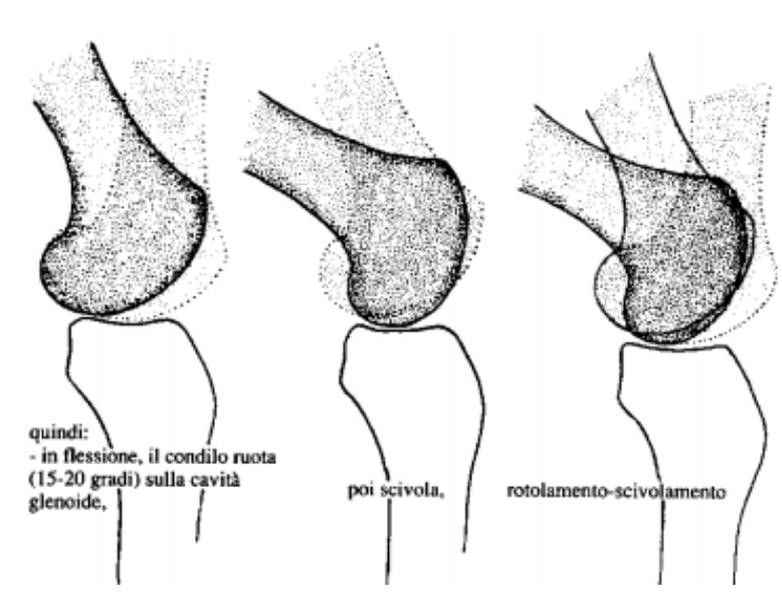


Figura 75 Moto di roto-traslazione del ginocchio sul piano sagittale

Senza questo movimento abbastanza complesso il femore cadrebbe dalla tibia. La roto-traslazione del ginocchio per disporre l'articolazione a 90° è stata simulata, riassumendo il movimento in tre step principali:

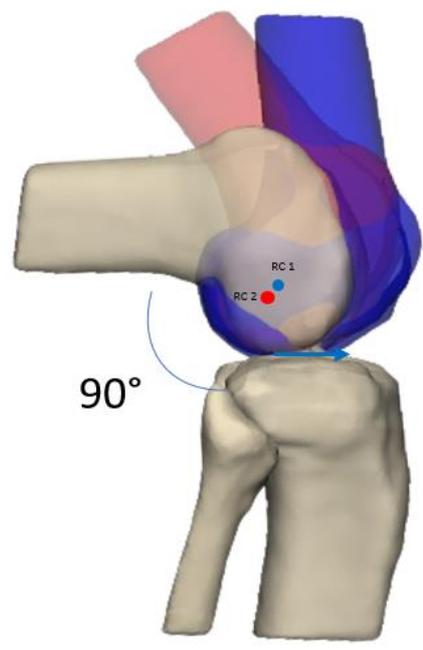


Figura 76 Flessione del modello sul piano sagittale realizzata su 3-Matic

- 1) Rotazione di 15° rispetto al centro di rotazione 1 (in blu) nel piano sagittale, insieme ad una traslazione anteriore del femore, sempre nel piano sagittale;
- 2) Rotazione del femore rispetto al centro di rotazione 2 (in rosso), nel piano sagittale, fino ai 90° ;

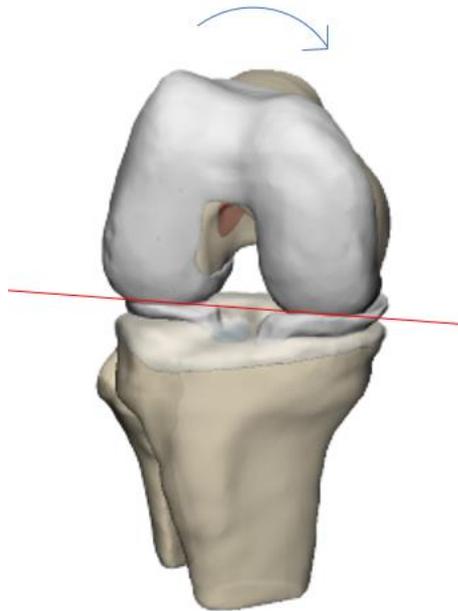


Figura 77 Rotazione del modello lungo il piano dei condili

- 3) Rotazione del femore di 3° lungo il piano dei condili, data la loro asimmetria, permettendo la chiusura del femore sulla tibia.

La cartilagine femorale, solidale al femore, è stata posizionata in modo corretto utilizzando un comando specifico su 3-Matic. Questo ha permesso di effettuare l'accoppiamento tra le due parti in modo iterativo, convergendo a un errore nullo una volta ottenuta la piena coincidenza. In altre parole, con il femore nella nuova posizione a 90° , la cartilagine ha ruotato e traslato per diverse iterazioni fino al risultato voluto.

La risonanza magnetica di partenza è stata ottenuta da un ginocchio in estensione. Perciò, una volta posta l'articolazione con la giusta angolazione è necessario flettere il tessuto molle in relazione ad essa. Questo passaggio è fondamentale poiché la

progettazione della guida chirurgica si basa, appunto, sulla superficie esterna del ginocchio.

Per ottenere la porzione di interesse a 90° è stato effettuato un modellamento del tessuto molle. A partire dalla struttura di partenza in estensione è stato posto un limite nella parte inferiore della rotula: la superficie al di sotto di essa si suppone rimanga costante durante la flessione. La superficie al di sopra di questo limite, invece, è stata marcata ed estrapolata. Dopodiché, essa è stata duplicata per diverse posizioni del femore durante la flessione.

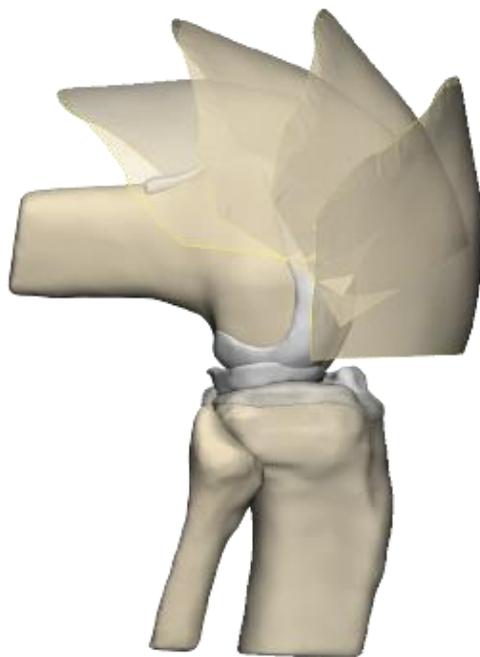


Figura 78 Superficie duplicata nelle varie angolazioni

In questo modo la superficie si trova a diverse angolazioni fino a quella voluta, a 90° . È stata effettuata, quindi, un'estrusione delle copie e, rimuovendo le parti in eccesso, si è ottenuto il risultato mostrato in figura. Si è ottenuto, quindi, un risultato simile alla realtà in cui la superficie si estende durante la flessione.



Figura 79 Estrusioni delle estremità femorale e tibiale

Dunque, con due piani orientati sono stati “catturati” i contorni delle estremità femorale e tibiale, effettuando un’ulteriore estrusione di circa 15 cm. In questo modo si è ricostruita la base su cui realizzare la guida.



Figura 80 Modello finale del ginocchio a 90°

Il modello ottenuto non coincide totalmente con la realtà dato che si tratta, ovviamente, di una modellazione. Il fine di questa tesi, però, è dimostrare un

approccio chirurgico, cioè come una guida custom made possa migliorare la precisione nella realizzazione dei tunnel tibiale e femorale. In un caso clinico reale sarebbe necessario disporre di una risonanza magnetica del soggetto con il ginocchio posto nella configurazione voluta per l'intervento. Il modello ottenuto, dunque, è valido per lo scopo proposto.

Capitolo 5

Progettazione di un tutore come guida chirurgica

Una delle cause principali di fallimento nella ricostruzione del LCA è l'orientamento errato nella realizzazione dei tunnel ossei. Le tecniche chirurgiche più recenti prevedono una ricostruzione anatomica del LCA, come la tecnica Anteromediale o la All-Inside. Esse permettono un ripristino funzionale più simile al legamento nativo grazie, oltretutto, all'indipendenza dei due tunnel, che devono essere realizzati, perciò, con estrema precisione. È stata progettata, dunque, una guida chirurgica specifica per il paziente. La progettazione è stata fatta basandosi su una tecnica di ricostruzione All-Inside a singolo fascio: con l'articolazione a 90° circa si realizzano due half-tunnel lunghi circa 25-30 mm, attraverso una fresatura manuale di tipo in-out.

Si tratta di un tutore chirurgico custom made che funge da guida durante l'intervento, tenendo l'articolazione del ginocchio a 90°. È costituito da tre parti principali con spessore di 5 mm:

1. Parte inferiore: è la parte d'appoggio della gamba, fornendo rigidità alla struttura;

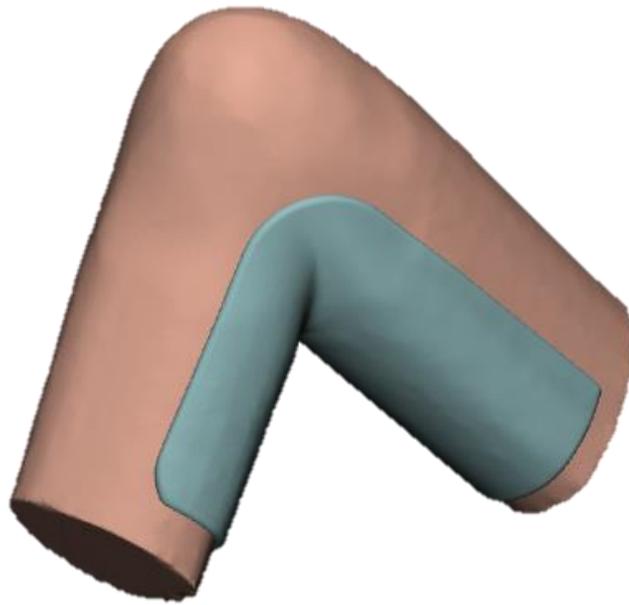


Figura 81 Parte inferiore dle tutore

2. Parte femorale: posta sopra la parte distale della coscia, presenta l'accesso per la realizzazione del tunnel femorale;



Figura 82 Parte femorale del tutore

3. Parte tibiale: posta sopra la parte prossimale della tibia, presenta l'accesso per la realizzazione del tunnel tibiale.

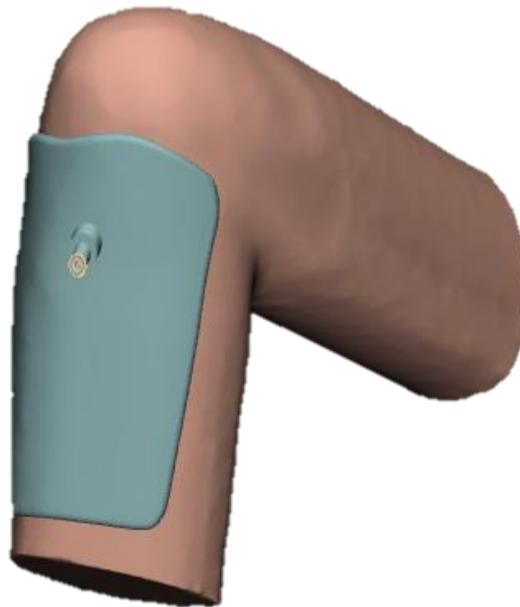


Figura 83 parte tibiale del tutore

Esse sono state realizzate in modo specifico per il paziente. Per ottenere un'elevata precisione, infatti, è necessario che le componenti aderiscano perfettamente alle superfici della porzione di interesse. A partire dal modello 3D flessso ottenuto, su 3-Matic® sono stati marcati i contorni del tutore sulla superficie. In questo modo si è partiti dallo “stampo” voluto e il tutore, così, presenta le tre parti congruenti al modello. In seguito al confronto con altri tutori ortopedici è stato scelto uno spessore di 5mm.

Una volta posizionate le tre componenti esse vengono fissate tra loro attraverso un sistema a clip con chiusura a scatto.

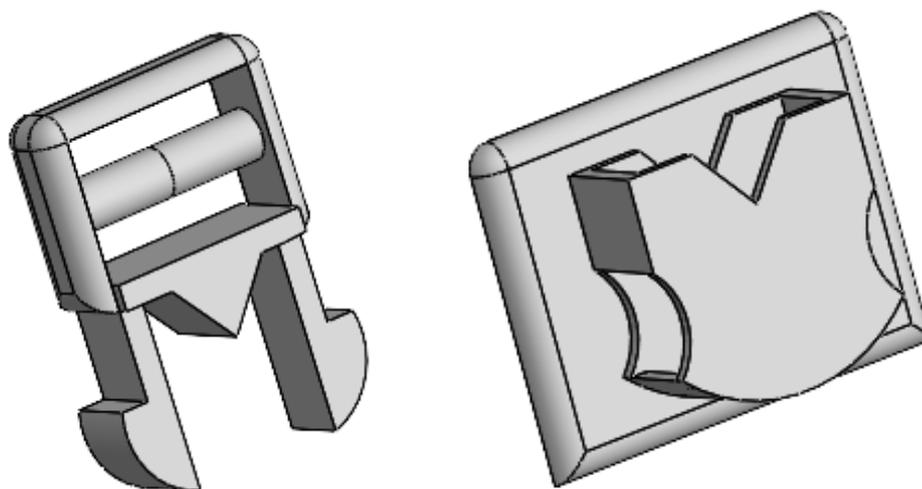


Figura 84 Componente maschio (a sinistra) e femmina (a destra) del sistema di fissaggio del tutore

I due elementi sono stati realizzati nel software SolidWorks®: il componente maschio (dimensioni 20x30x14 mm) verrà inserito nella componente femmina (dimensioni 20x20x7,5 mm) la quale è posizionata, attraverso una base, nella parte inferiore del tutore.

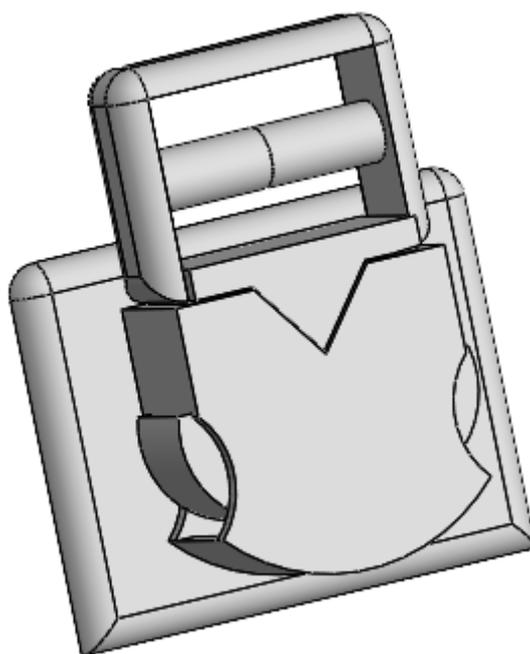


Figura 85 Sistema di fissaggio in chiusura

Il componente maschio è legato, attraverso una fibbia in velcro, ad un ulteriore elemento posto nelle parti femorale e tibiale, permettendo una regolazione della fissazione.

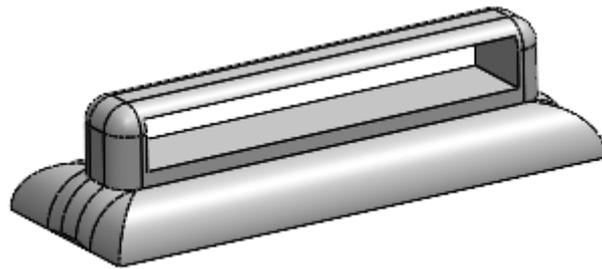


Figura 86 elemento di supporto al sistema di fissaggio

Nella figura 84 è presentato il tutore con il sistema di fissaggio.

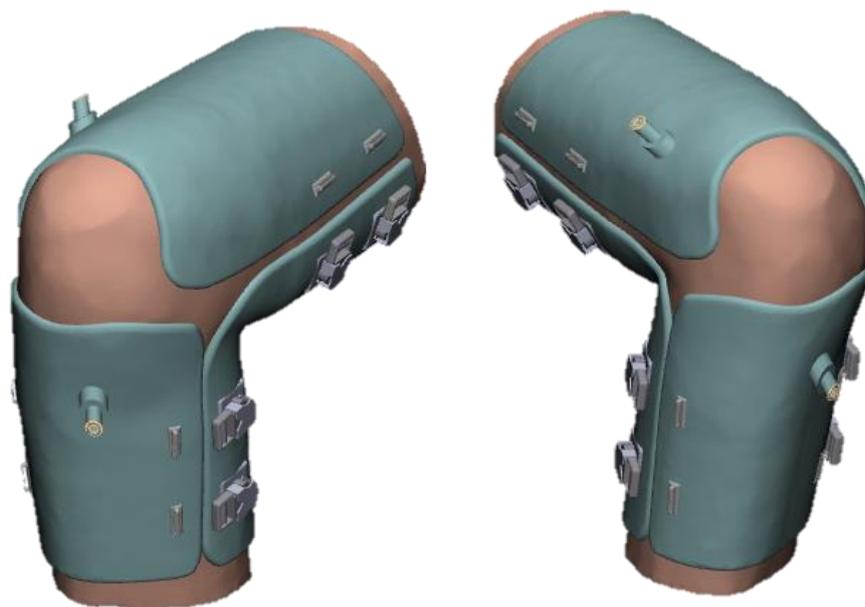


Figura 87 Tutore chirurgico completo dei sistemi di fissaggio

Il tutore avvolge l'articolazione lasciando scoperta la parte frontale superiore alla tibia:

- il chirurgo può fare delle valutazioni grazie al contatto diretto con questa parte del ginocchio;
- possono essere eseguiti liberamente i portali antero-mediale e antero-laterale, con i quali si effettua una valutazione artroscopica;

- viene immessa nel ginocchio una soluzione fisiologica acquosa, perciò l'articolazione è libera di espandersi.

La realizzazione degli accessi guida per l'esecuzione dei tunnel ossei si basa, innanzitutto, sulle impronte del legamento crociato anteriore nativo.

5.1 Visualizzazione delle impronte tibiale e femorale del LCA nativo

La ricostruzione del LCA è specifica per ogni paziente poiché l'anatomia di ogni soggetto è essa stessa specifica. Il successo dell'intervento si basa su questa specificità, perché una buona analisi preventiva sull'anatomia del ginocchio può permettere, ad esempio, un'ottima realizzazione dei tunnel ossei. Questo è uno dei parametri fondamentali affinché l'innesto non vada incontro a fallimento nel periodo successivo all'operazione a causa di un'insorgenza di instabilità. I tunnel ossei vanno realizzati il più possibile all'interno delle impronte native del legamento e per questo motivo la loro previa individuazione è molto importante. Prevedendo, inoltre, le dimensioni delle impronte si può determinare il diametro adatto per la creazione degli accessi nel tutore chirurgico e, dunque, dei tunnel.

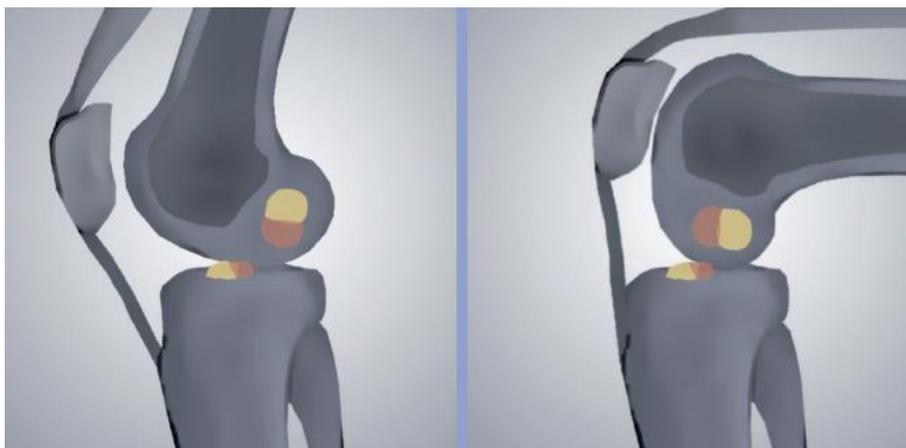


Figura 88 Posizione teorica delle inserzioni del LCA [106]

Per individuare e visualizzare correttamente le impronte native sono state analizzate le immagini di risonanza magnetica, attraverso una valutazione medica e un confronto con l'anatomia in letteratura.

L'inserzione tibiale del LCA è localizzata nella fossa intercondiloidea anteriore sul piatto tibiale, davanti e lateralmente alla spina tibiale anteriore. Presenta una forma ovale o triangolare ed è l'inserzione più ampia tra le due perché le fibre si allargano nell'attacco alla parte ossea. [106]

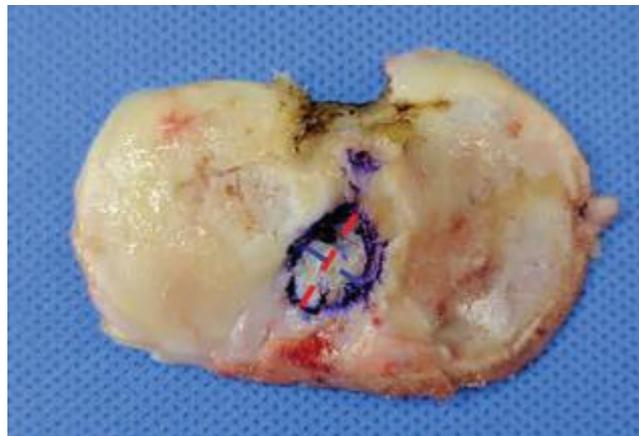


Figura 89 Esempio di un'impronta tibiale del LCA [107]

L'inserzione tibiale può essere visualizzata più facilmente nella vista sagittale della risonanza magnetica. Effettuando un confronto con una risonanza di un ginocchio sano è stato possibile definire l'impronta nel piano sagittale su Mimics®.

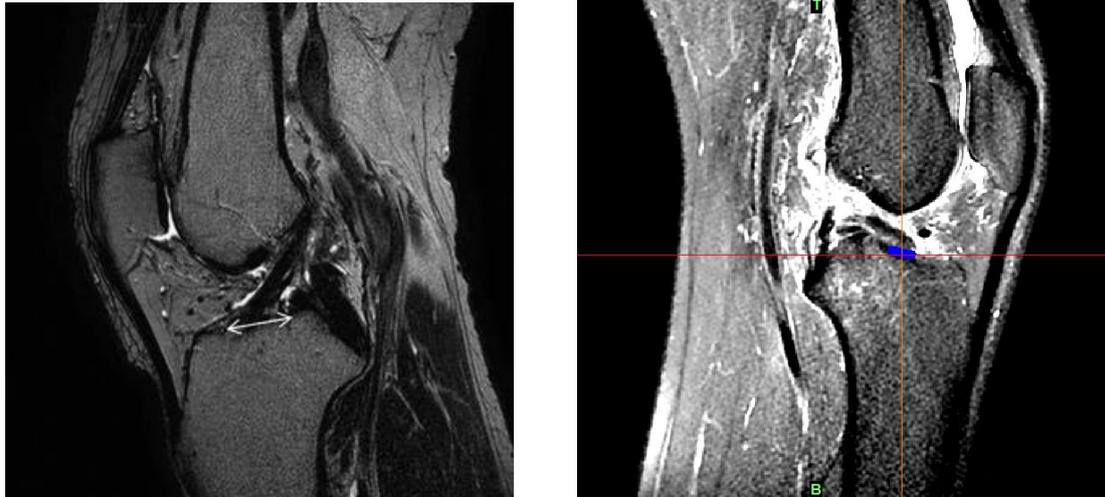


Figura 90 Impronta tibiale nella vista sagittale della risonanza magnetica

A partire da questa vista è stata identificata l'impronta tibiale anche nei piani coronale e assiale.

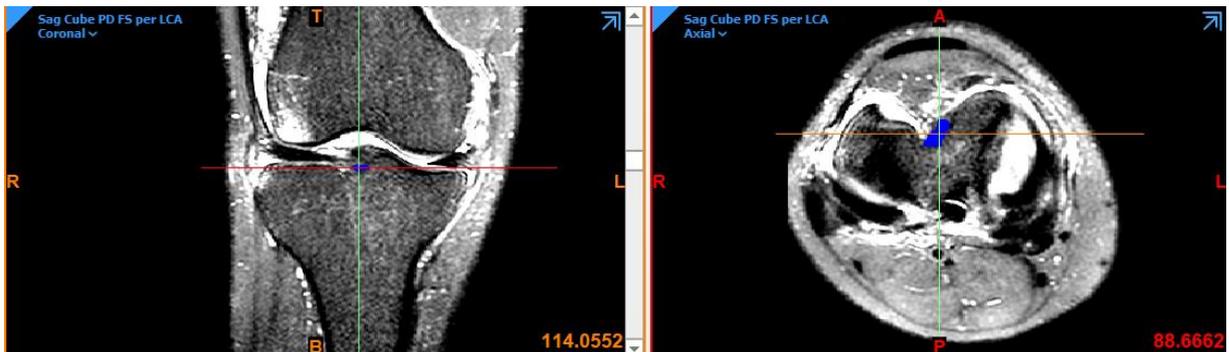


Figura 91 Impronta tibiale nelle viste coronale e assiale

Da un punto di vista anatomico, l'impronta è generalmente descritta con il ginocchio in estensione. L'inserzione femorale segue il contorno della cartilagine articolare della parte posteromediale del condilo femorale laterale. [106]



Figura 92 griglia parallela all'asse del LCA nella vista coronale della risonanza magnetica

Nell'immagine è raffigurata una griglia parallela all'asse del LCA, utilizzata come valutazione medica per l'individuazione delle inserzioni. Sulla base di queste informazioni è stata creata la maschera relativa all'impronta femorale.

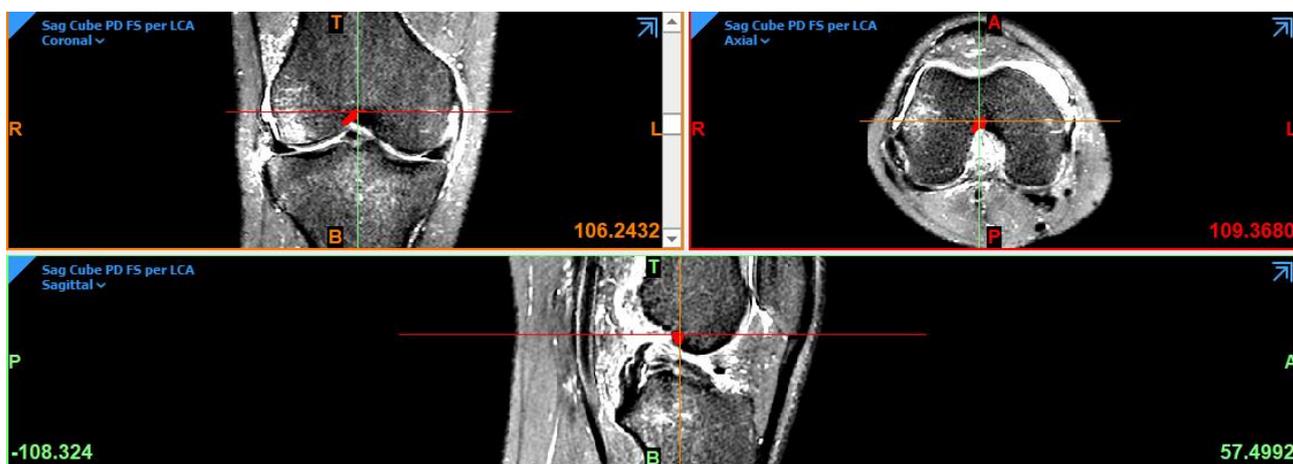


Figura 93 Impronta femorale nelle tre viste della risonanza magnetica

Una volta realizzate le maschere relative alle due impronte native su Mimics®, sono stati calcolati gli objects associati e importati su 3-Matic®. Con una breve fase di post processing sono stati inseriti alcuni accorgimenti sulla forma delle inserzioni,

rendendole più regolari. La visualizzazione nel modello 3D flessa ed estesa è rappresentata nella seguente figura.

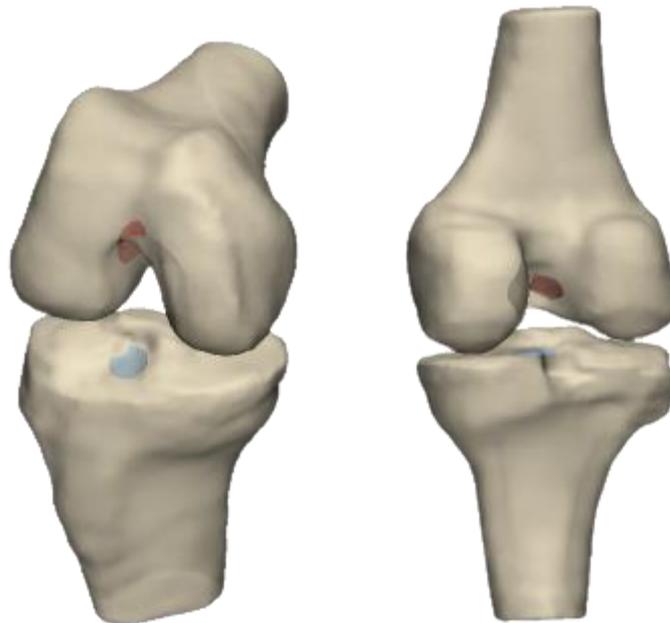


Figura 94 Visualizzazione delle impronte femorale (rosso) e tibiale (blu) nel modello 3D in flessione ed estensione

5.2 Accessi chirurgici per i tunnel tibiale e femorale

Con la tecnica chirurgica AI si ottiene un orientamento più anatomico del tunnel tibiale. È importante che l'innesto si trovi tra le due spine tibiali: un posizionamento troppo anteriore causa un conflitto tra l'innesto e la troclea, limitando l'estensione del ginocchio, mentre il posizionamento troppo posteriore può portare ad un'eccessiva verticalizzazione dell'innesto, ridotta resistenza alla traslazione tibiale anteriore e un possibile conflitto con il LCP oltre i 90° gradi di flessione. Durante un generico intervento di ricostruzione vengono utilizzate guide tibiali con angolazione compresa tra 45 e 65° rispetto al piano su cui è orientato il tunnel tibiale: l'inclinazione di queste guide, simili ad un compasso, determinano la lunghezza del tunnel. È importante, inoltre, evitare che l'innesto abbia dimensioni inadeguate e che, una volta posizionato, fuoriesca. Ciò potrebbe creare problemi di sintesi dopo l'intervento e per questo motivo è fondamentale la misura del tratto osseo per il tunnel, mediante una metodica

diretta o indiretta: la prima consiste nella misurazione del tunnel in relazione alla lunghezza dell'innesto; la seconda è chiamata anche “regola del 7” poiché si aggiunge questo numero alla misura dell'innesto, ottenendo come risultato l'angolazione per la creazione del tunnel osseo. [108]

Sulla base di queste considerazioni, dalle specifiche fornite in letteratura relativamente alla tecnica All-Inside [109] e da una valutazione anatomica dello specifico caso in questione, è stato definito l'orientamento e la posizione del tunnel tibiale: 20° sul piano frontale e 25° (antiorario, corrispondente a 65°) sul piano sagittale.

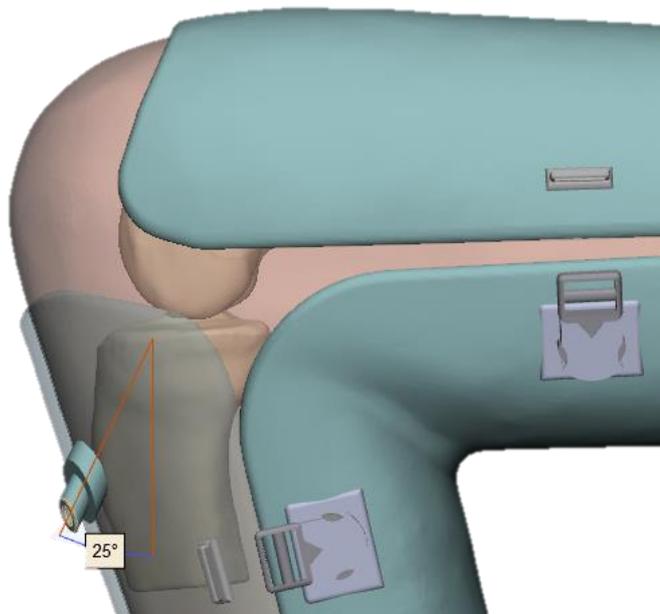


Figura 95 Orientamento di 25° sul piano sagittale

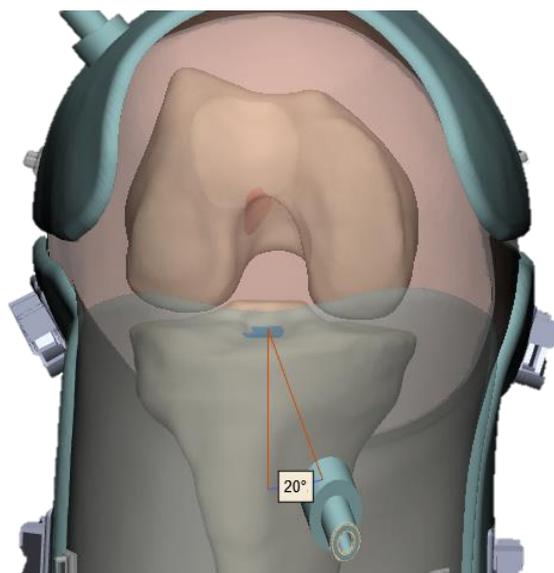


Figura 96 Orientamento di 20° sul piano frontale

Con lo stesso orientamento è stato aggiunto alla parte tibiale del tutore l'accesso chirurgico: attraverso questo ingresso verrà introdotto un "drill guide" con la quale verrà creato l'half-tunnel. L'accesso presenta un diametro interno di 4mm e uno esterno di 6mm. Una volta raggiunta l'impronta tibiale la guida si trasforma in "retro-drill" eseguendo una fresatura manuale out-in creando un tunnel di circa 25mm. Il diametro, in generale, è variabile tra i 6 e i 9 mm.

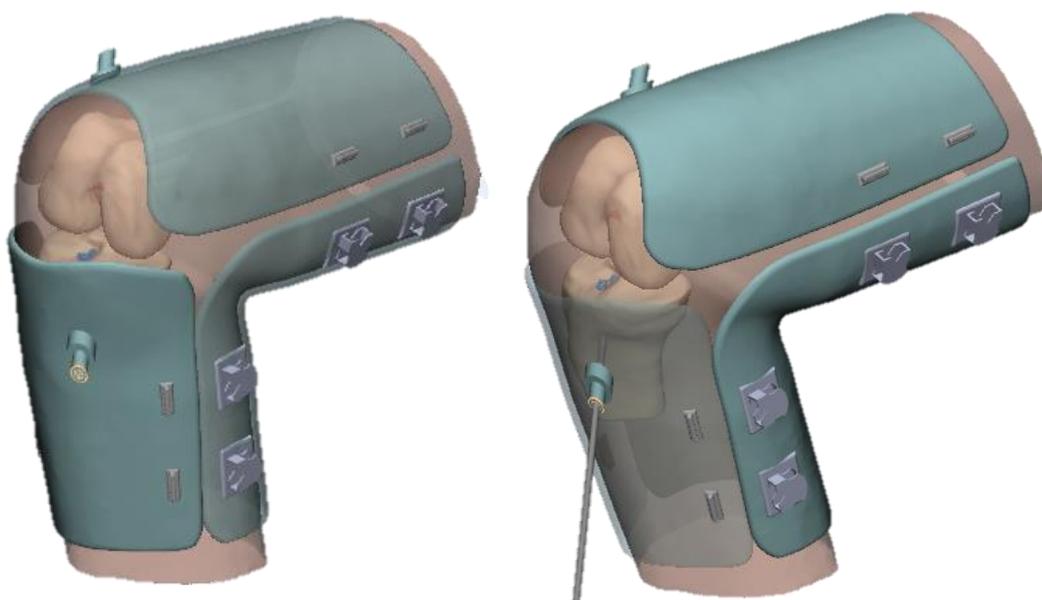


Figura 97 Accesso tibiale per la fresa chirurgica

Più critica, invece, la posizione del tunnel femorale per quanto riguarda la funzione del neolegamento, la vicinanza con il centro di rotazione del ginocchio e poiché da esso dipendono in grande misura le variazioni di lunghezza del graft durante la flessione ed estensione. Si preferisce, in genere, realizzare il tunnel in prossimità dell'inserzione delle fibre del fascio anteromediale, poiché più isometrico di quello posterolaterale. Una corretta visualizzazione della gola trocleare e dell'inserzione del legamento nativo (ottenuta in precedenza) permette, dunque, un'ottima valutazione preoperatoria [108].

Indipendentemente dalla tecnica utilizzata per la sua preparazione il tunnel femorale deve essere orientato possibilmente a "ore 10" per il ginocchio destro e a "ore 2" circa per il ginocchio sinistro, in modo da ottenere un migliore ripristino biomeccanico del ginocchio e aumentare la resistenza alle sollecitazioni sia in traslazione che rotazione [108].

L'accesso femorale, dunque, è stato posizionato all'incirca 2 cm prossimalmente e 1 cm anteriormente dall'epicondilo femorale laterale. L'angolazione è 40° sul piano frontale femorale e 45° sul piano sagittale [109].

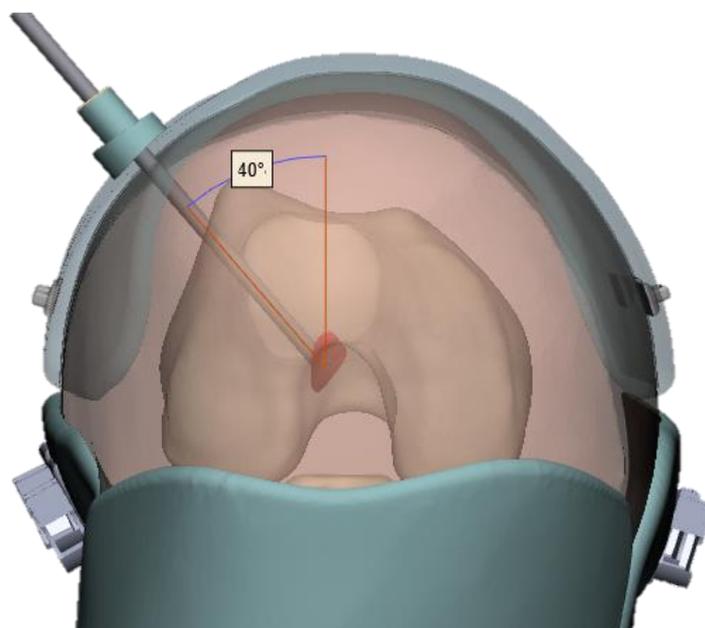


Figura 98 Orientamento dell'accesso femorale di 40° sul piano frontale

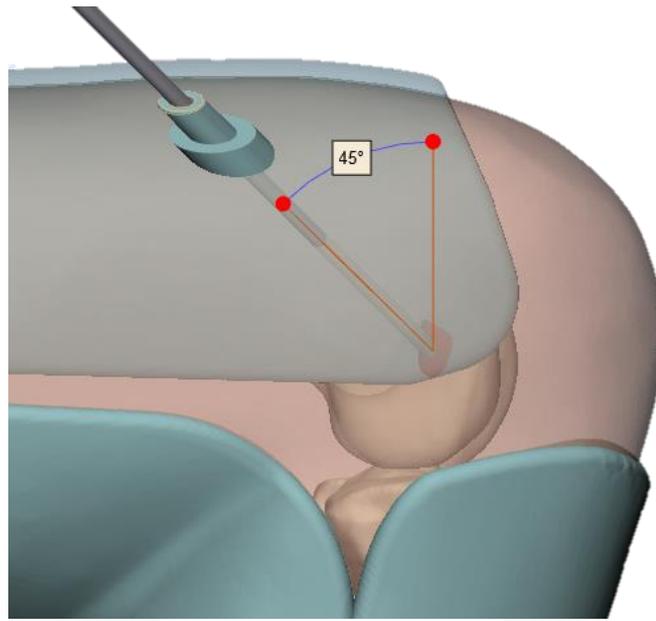


Figura 99 Orientamento dell'accesso femorale di 45° sul piano sagittale



Figura 100 Accesso tibiale per la fresa chirurgica

5.3 Simulazione della stampa 3D

La realizzazione del tutore chirurgico può avvenire tramite stampa 3D. In questo studio è stato presentato l'approccio e le potenzialità nell'uso di questo dispositivo, perciò l'effettiva stampa è stata simulata.

Il materiale scelto è la resina Grey: una resina polimerica che presenta un'alta risoluzione e permette, quindi, di realizzare geometrie abbastanza complesse; fornisce robustezza al prodotto realizzato e, dunque, perfetta per l'applicazione specifica. Nella tabella 5 vengono indicati i parametri tecnici di questo materiale.

Resina Grey	
Densità	1,09 g/cm ³
Coefficiente di Poisson	0,3
Modulo Elastico	1,6 GPa
Carico di Rottura	38 Mpa

Tabella 5 Specifiche tecniche della resina Grey

I tre componenti, in formato .STL, vengono importati nel software Preform® dove avviene la simulazione di stampa.

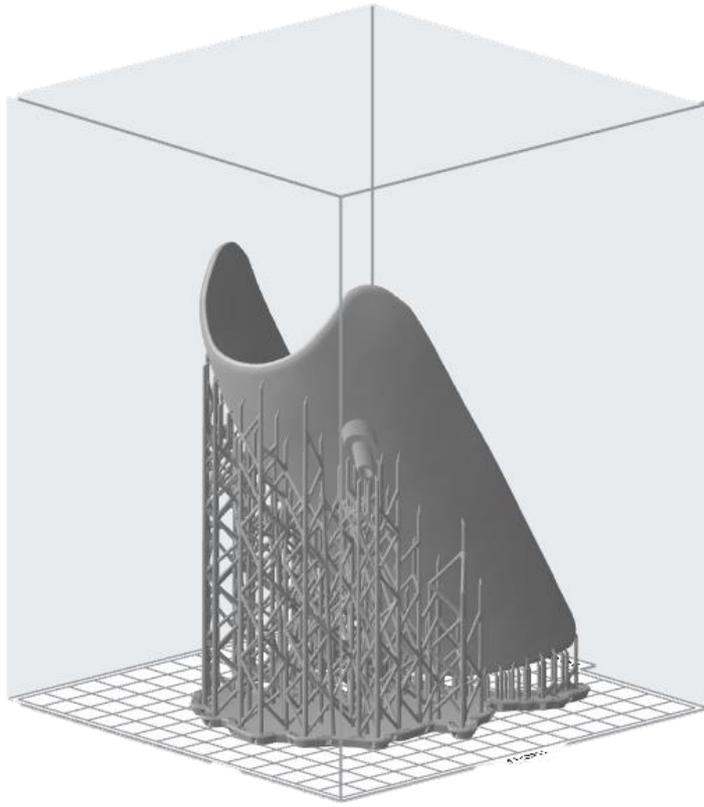


Figura 101 Simulazione di stampa del componente femorale

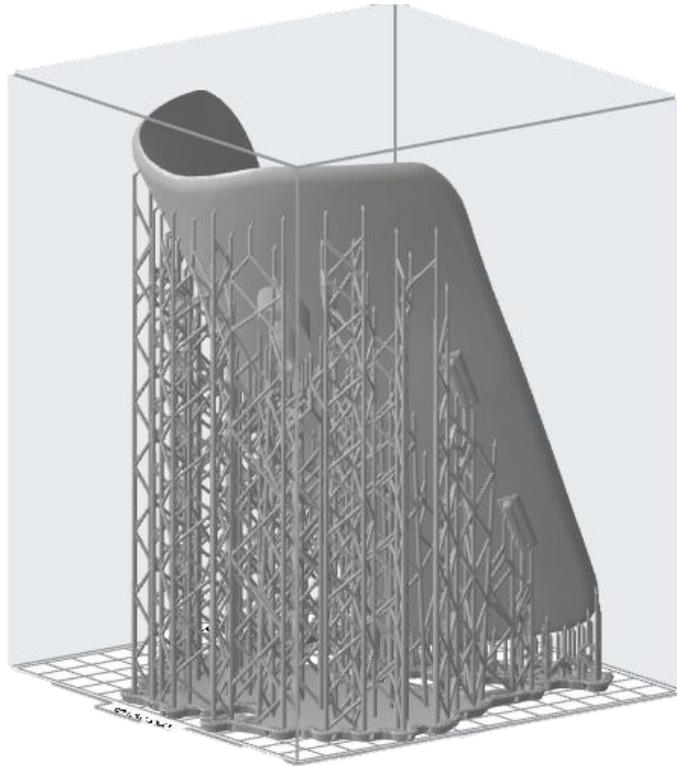


Figura 102 Simulazione di stampa del componente tibiale

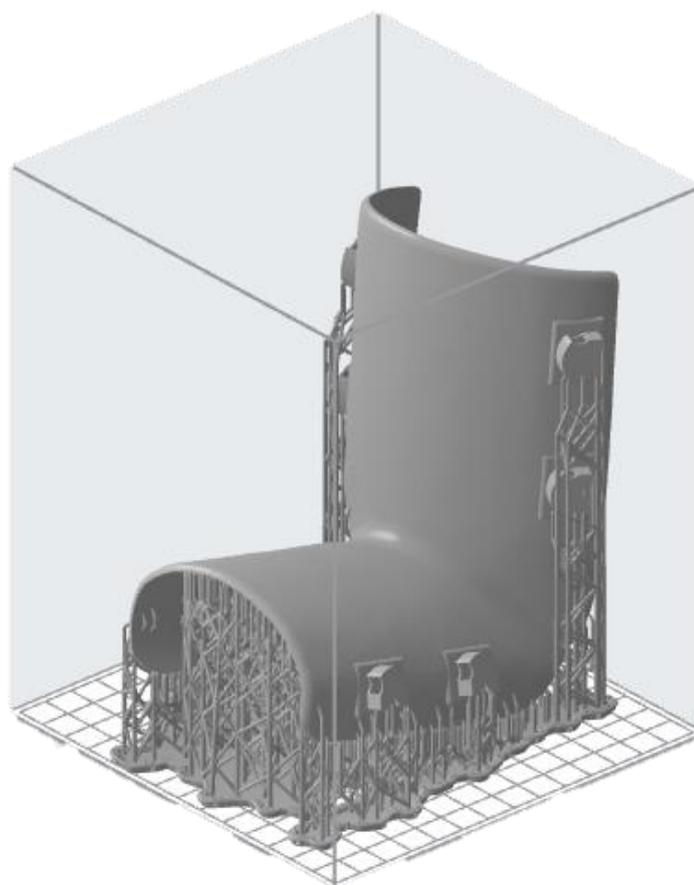


Figura 103 Simulazione di stampa del componente inferiore del tutore

Nella seguente tabelle sono riportati i volumi necessari alla stampa dei tre componenti.

Componente	Volume (ml)
Parte inferiore	118,38
Parte femorale	64,49
Parte tibiale	161,58

Tabella 6 Volume relativo ai componenti del tutore chirurgico

Il volume totale del tutore è pari a 344,45 ml. Tenendo conto del costo al litro della resina Grey pari a 135,00€ si può stimare il costo di stampa del dispositivo pari a 46,50€.

5.4 Analisi agli elementi finiti

Durante l'operazione il paziente è supino con la gamba sollevata e l'articolazione del ginocchio a 90°. In un generico intervento di ricostruzione del LCA vengono utilizzati dei supporti sotto il piede e lateralmente la coscia per mantenere la stabilità dell'arto. Il materiale costituente del tutore garantisce una rigidità tale da mantenere la gamba in questa configurazione. È stata, dunque, effettuata una verifica di tale robustezza del dispositivo mediante un'analisi agli elementi finiti su Ansys®.



Figura 104 Configurazione della gamba durante la ricostruzione del LCA

Per la soluzione del problema sono state impostate le seguenti condizioni al contorno e sono state fatte alcune ipotesi per effettuare una semplificazione per evitare un'alterazione dei risultati.

Per questa analisi è stata presa in considerazione la componente inferiore del tutore, ipotizzando la gamba inferiore libera da qualsiasi supporto e che imprima, perciò, la forza del suo peso.

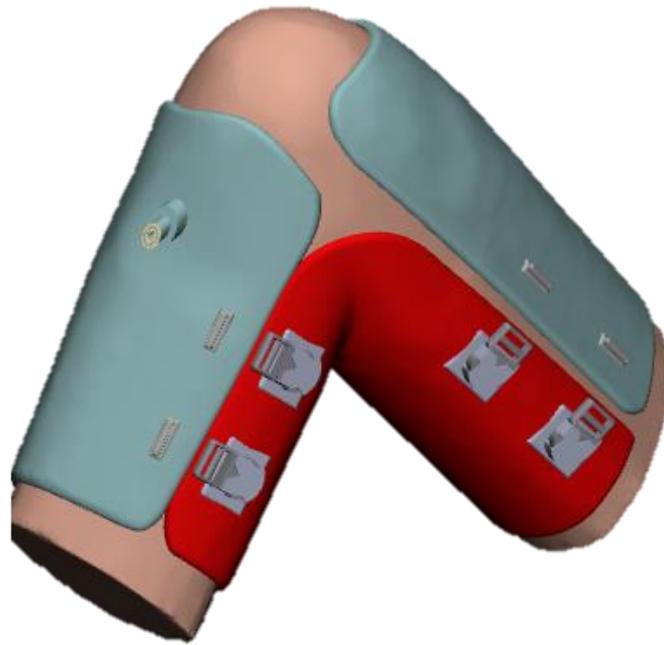


Figura 105 Componente inferiore del tutore chirurgico per l'analisi FE

Si considera la porzione al di sotto della coscia vincolata, simulando l'incastro dovuto all'articolazione dell'anca.

B: Static Structural
 Fixed Support
 Time: 1, s
 12/03/2021 12:23

■ Fixed Support

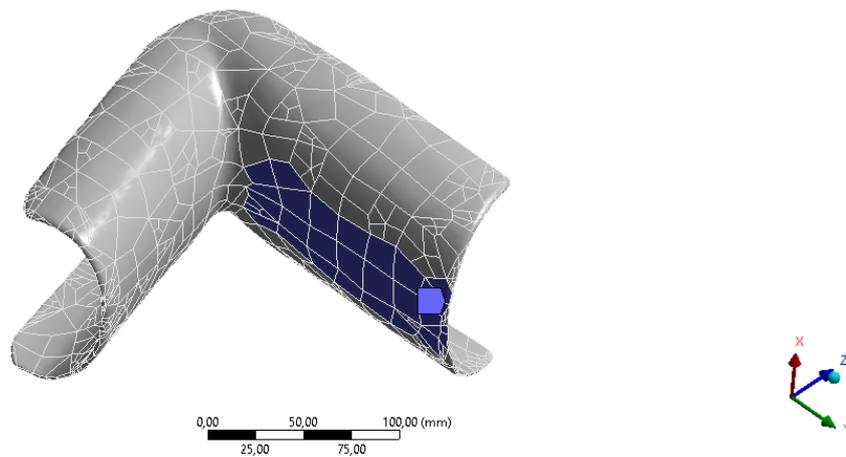


Figura 106 Vincoli cinematici

Dalla conoscenza di dati antropometrici forniti in letteratura è stato possibile stimare il peso della gamba inferiore. [110] A partire dal peso del soggetto di 70 Kg, con il valore di massa relativa della porzione di interesse si è ottenuto un peso di circa 4 Kg e di conseguenza una forza peso $F_p = 4 \cdot g \approx 40\text{N}$ dove g è la costante di gravità.

L'angolo al vertice del tutore è di 90° , dunque si avrà una componente lungo l'asse Y pari a:

$$F = F_p \cdot \cos(45^\circ) = 28,28 \text{ N.}$$

B: Static Structural

Force

Time: 1, s

12/03/2021 12:23

Force: 28,28 N
Components: 0,;28,28;0, N

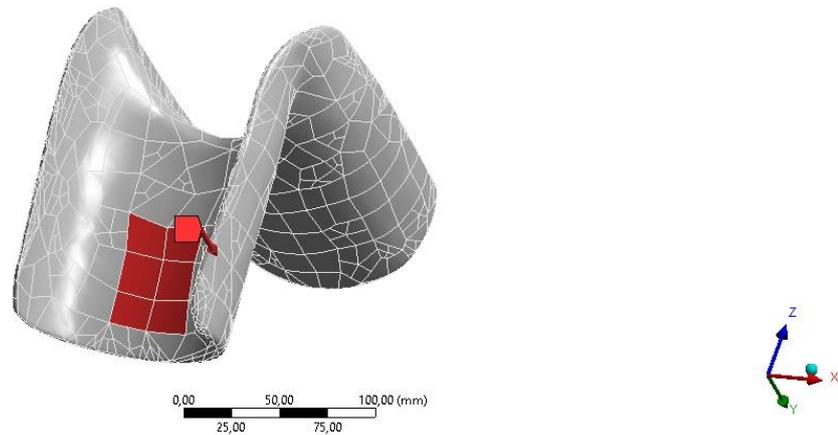


Figura 107 Applicazione della componente lungo l'asse Y della forza peso

Il materiale, la resina Grey, è isotropo elastico lineare, le cui caratteristiche sono state illustrate nel paragrafo precedente (tabella 5).

A questo punto è stata eseguita un'analisi della convergenza per valutare la migliore mesh con cui effettuare lo studio della struttura, utilizzando elementi Tet10 (tetraedrici a 10 nodi). Per lo studio della convergenza si terrà conto della tensione equivalente di Von Mises.

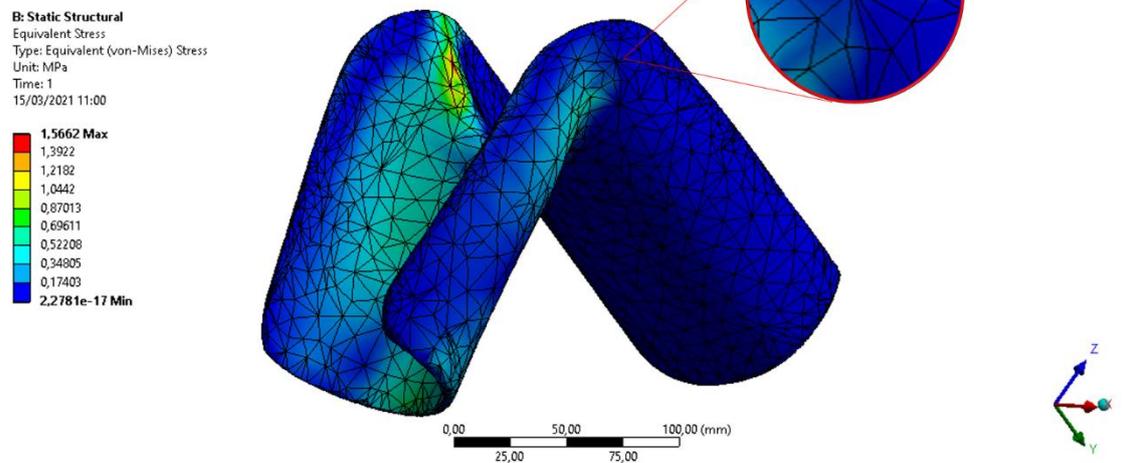


Figura 108 Mesh con elementi di dimensioni di 16 mm

La mesh di default imposta dal software presenta una dimensione degli elementi di 16 mm. Sono state eseguite 9 iterazioni diminuendo progressivamente la dimensione degli elementi, a partire dalla mesh di default. Le misure prese in considerazione per lo studio sono 8, 4, 2, 1.8, 1.6, 1.4, 1.2 e 1 mm.

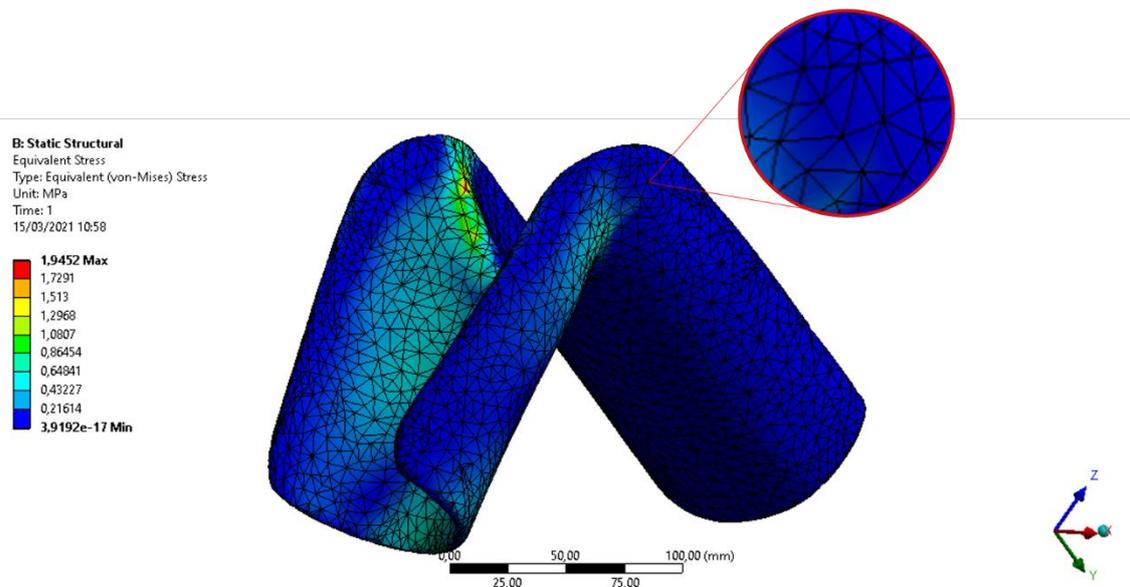


Figura 109 Mesh con elementi di dimensioni di 8 mm

B: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
15/03/2021 10:55

2.0656 Max
1,8961
1,6066
1,3771
1,1476
0,91805
0,68854
0,45902
0,22951
4.6552e-17 Min

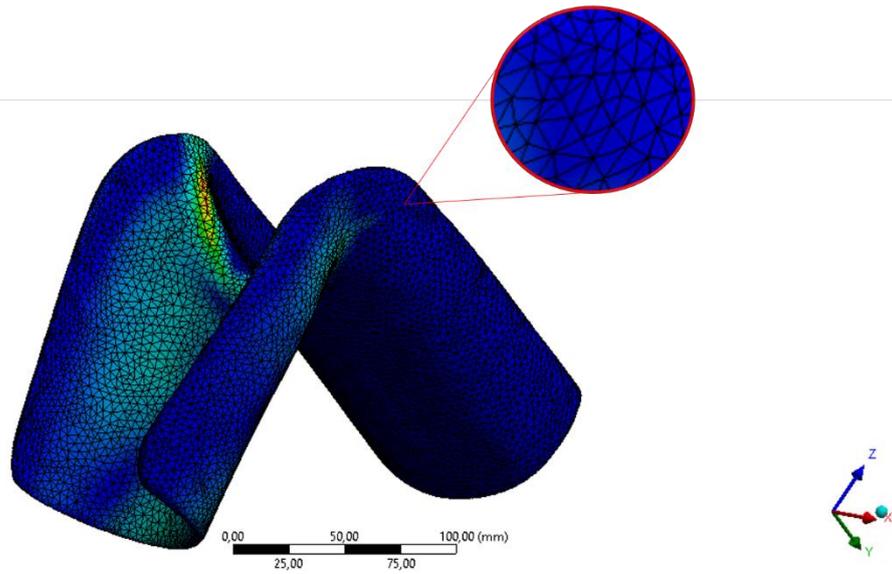


Figura 110 Mesh con elementi di dimensioni di 4 mm

B: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
15/03/2021 10:52

2.7797 Max
2,4708
2,162
1,8531
1,5443
1,2354
0,92655
0,6177
0,30885
3.7884e-15 Min

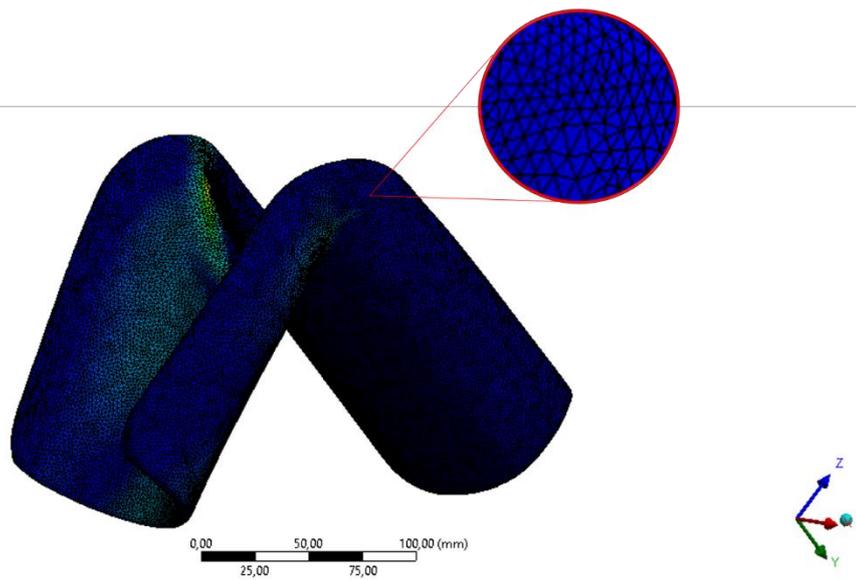


Figura 111 Mesh con elementi di dimensioni di 2 mm

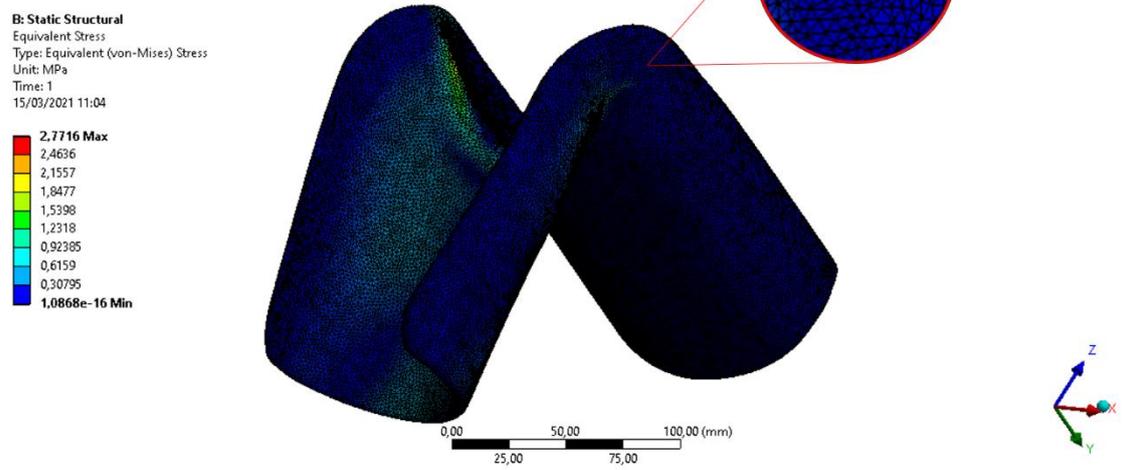


Figura 112 Mesh con elementi di dimensioni di 1.8 mm

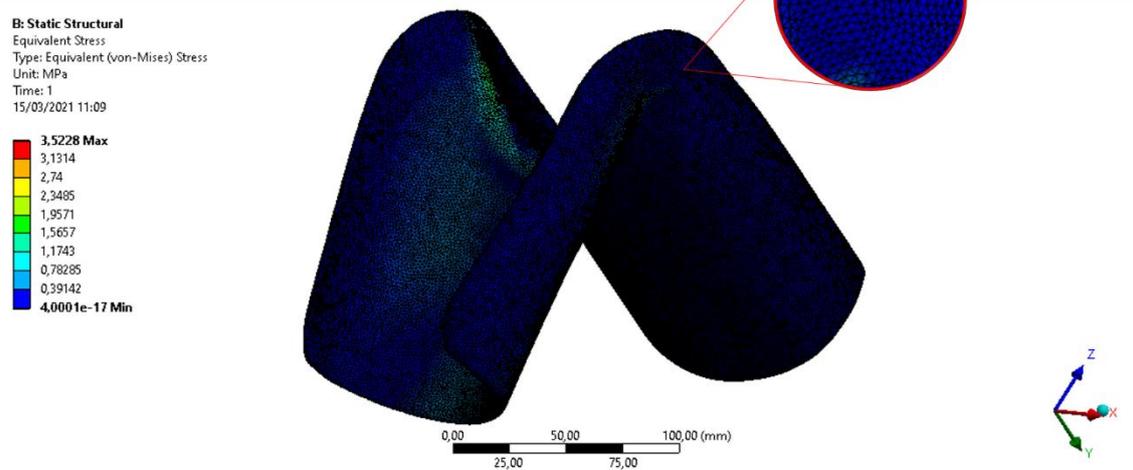


Figura 113 Mesh con elementi di dimensioni 1.6 mm

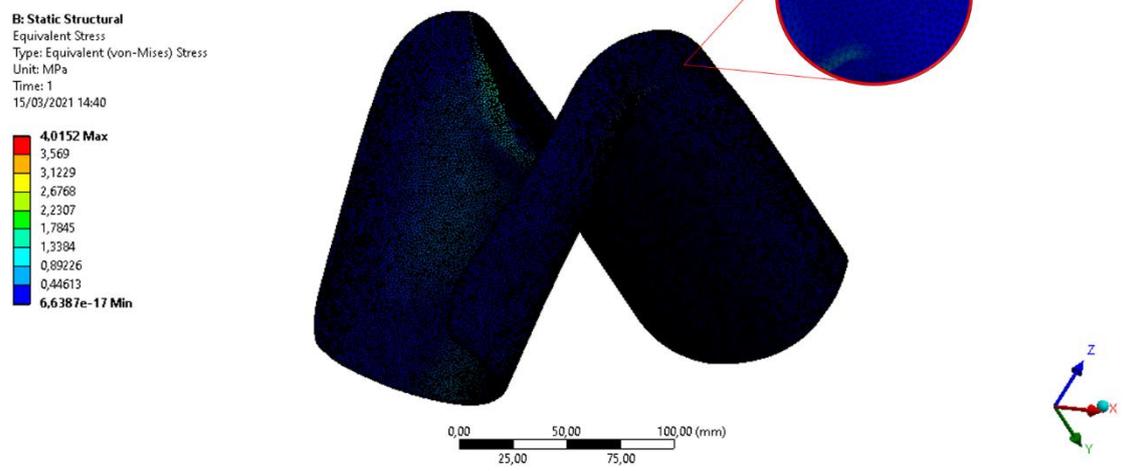


Figura 114 Mesh con elementi di dimensioni 1.4 mm

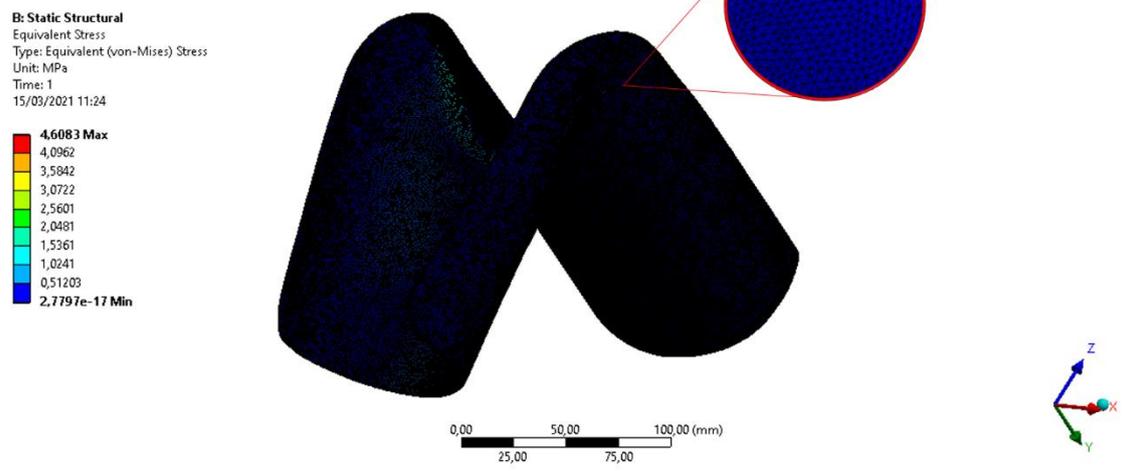


Figura 115 Mesh con elementi di dimensioni 1.2 mm

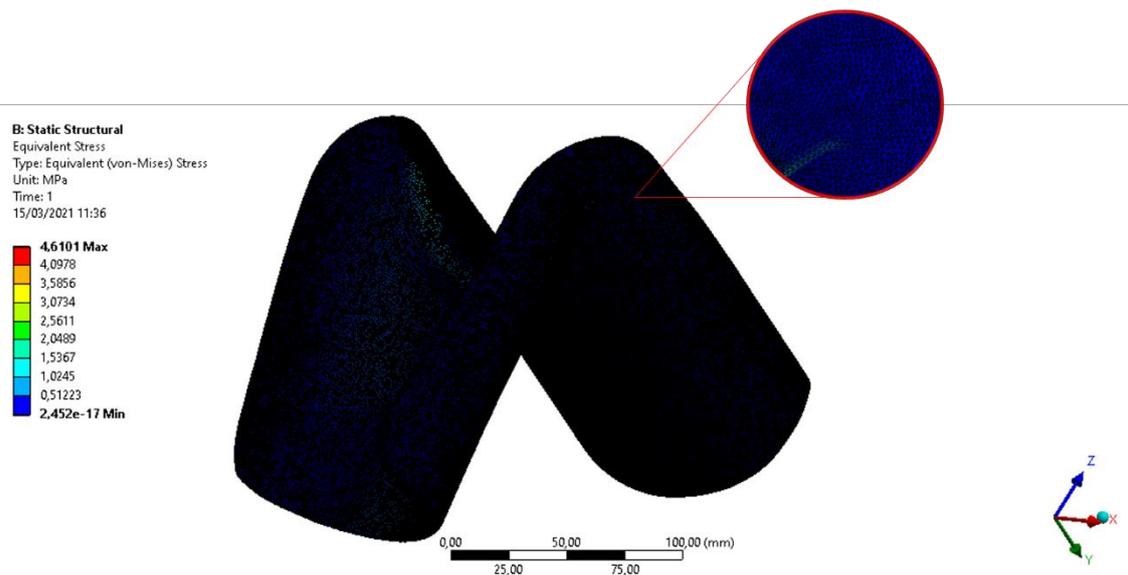


Figura 116 Mesh con elementi di dimensioni 1 mm

Sono riassunti i risultati nel seguente grafico.

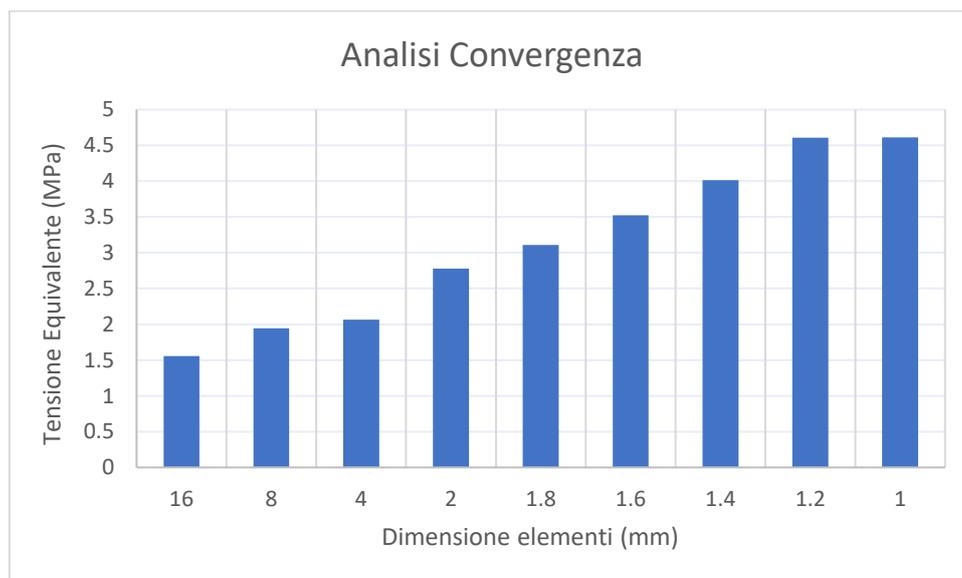


Figura 117 Grafico dell'analisi della convergenza

Imponendo un errore percentuale massimo dell'1% per ottenere la convergenza, si evidenzia che essa è raggiunta per una mesh con elementi di dimensioni 1.2 mm. La differenza di tensione equivalente massima con la mesh con elementi di 1 mm è molto piccola, perciò, oltre che per un costo computazionale inferiore, è stata selezionata la mesh con dimensioni di 1.2 mm come la migliore.

Dimensione degli elementi (mm)	Errore (%)
16	//
8	24,99
4	6,19
2	34,57
1,8	11,76
1,6	13,39
1,4	13,98
1,2	14,77
1	0,04

Tabella 7 errore % relativo alle diverse mesh

Sono di seguito mostrati i risultati relativi alla tensione equivalente di Von Mises, deformazione totale e deformazione lungo l'asse Y.

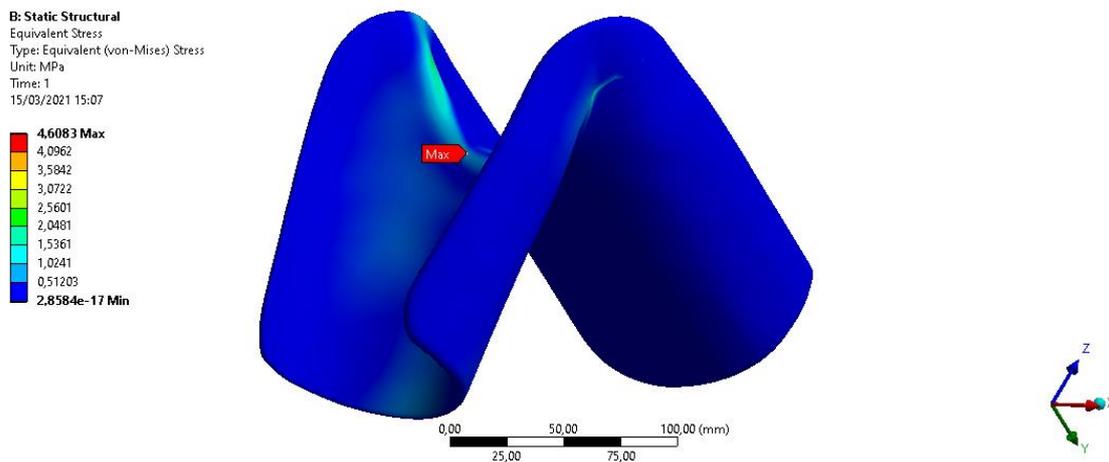


Tabella 8 Tensione equivalente di Von Mises

Il massimo della tensione equivalente, di valore pari a 4,61 MPa, si trova, come ci si aspettava, nel punto di intersezione delle due parti del componente del tutore. La concentrazione degli sforzi, infatti, si localizza in corrispondenza di cambiamenti nella

geometria e punti di vincolo. Questo avviene poiché la distribuzione delle tensioni risulta essere discontinua nel caso di una geometria che varia in modo non regolare della struttura. La tensione è molto inferiore rispetto al carico di rottura del materiale (38,00 Mpa). La configurazione geometrica progettata, ha permesso, quindi, di ottenere un margine di sicurezza elevato, circa 8 volte, rispetto alla tensione di rottura del materiale in condizioni statiche.

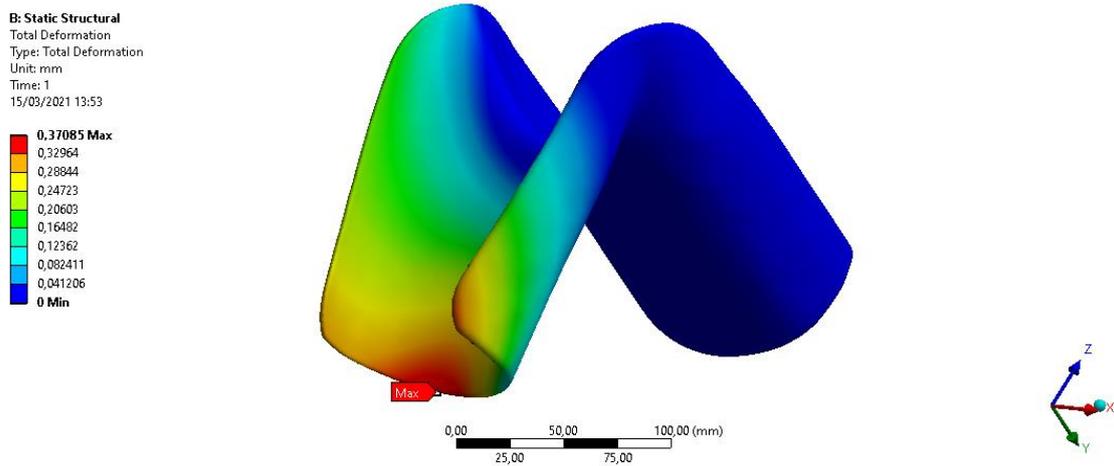


Tabella 9 Deformazione totale

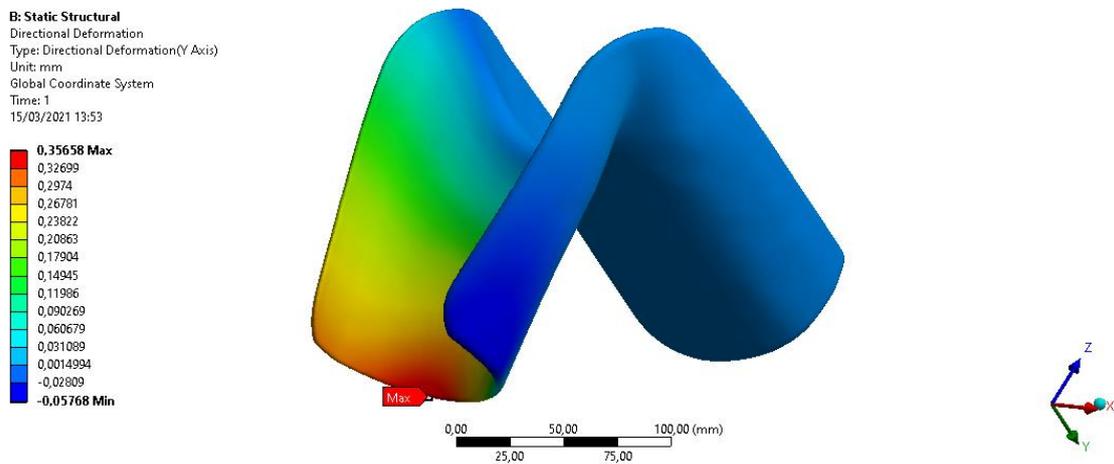


Tabella 10 Deformazione lungo l'asse Y

La deformazione totale e direzionale (lungo l'asse Y) presentano il massimo nell'estremità inferiore del tutore, con valori rispettivamente di 0,39 mm e 0,36 mm, in accordo con la posizione del massimo momento flettente. Lo spostamento è molto

piccolo, prossimo allo zero, dimostrando, così, il comportamento desiderato del dispositivo.

5.5 Confronto operatorio

I passi principali che si compiono durante un intervento di ricostruzione del LCA sono [108]:

1. valutazione artroscopica e trattamento di eventuali lesioni associate (meniscali o cartilaginee);
2. prelievo dell'innesto;
3. preparazione della gola intercondiloidea e della regione tibiale;
4. realizzazione dei tunnel tibiale e femorale;
5. inserimento e posizionamento dell'innesto;
6. fissazione e valutazione clinica postoperatoria della stabilità;
7. trattamento postoperatorio e riabilitativo.

La ricostruzione avviene nelle stesse modalità anche con l'uso del tutore chirurgico presentato, ma, ovviamente, con qualche differenza.

Al paziente, posizionato in decubito supino, solitamente in rachianestesia, viene eseguito un esame clinico del ginocchio e successivamente applicato un laccio emostatico alla radice della coscia. In questa fase di preparazione è verificata, in genere, la libertà di movimento del ginocchio che durante l'intervento, stavolta, verrà mantenuto flesso a 90° grazie all'uso del tutore.

In questo caso la diagnosi sarà certa, poiché la ricostruzione del ginocchio e la progettazione del tutore si basano su una precisa valutazione medica, e perciò il prelievo dell'innesto precederà l'artroscopia; la ricostruzione avviene con arto ischemico inserendo il laccio emostatico nella coscia prossimale ad una pressione pari a 350 mmHg e utilizzando un sistema di lavaggio articolare con una pressione con valori compresi tra 40 e 50 mmHg. [108]

Una volta prelevato l'innesto si applica il tutore (previamente sterilizzato): prima la parte inferiore e in seguito le parti femorale e tibiale. Attraverso il sistema di chiusura a clip si fissano, quindi, le componenti al ginocchio. La parte al di sopra della tibia, dove sporge la rotula, è scoperta: il chirurgo è libero di posizionare i due portali artroscopici e non vi è difficoltà di movimento dell'attrezzatura. Si procede con la preparazione della gola intercondiloidea e della regione tibiale, rimuovendo eventuali residui del LCA nativo. A questo punto, utilizzando una classica guida veniva inserito il perno della stessa nell'articolazione fino all'impronta tibiale o femorale, per poi eseguire il tunnel. Questa procedura, oltre che invasiva, rischia di provocare imprecisioni per quanto riguarda l'orientamento e la posizione finale. Il tutore invece, grazie agli accessi femorale e tibiale, permette al chirurgo di realizzare i tunnel ossei con grande precisione: attraverso questi accessi viene inserita la guide pin che, una volta raggiunta l'impronta, si trasforma in retro-drill eseguendo gli half tunnel. Viene poi inserito l'innesto scelto, ad esempio il semitendinoso o gracile; il tutore può, a questo punto, essere rimosso e viene eseguito il tensionamento e successivamente il posizionamento finale del graft mediante gli appositi sistemi di fissaggio.

Conclusioni

La lesione del LCA rimane uno degli infortuni più comuni in tutto il mondo, specialmente tra i giovani. Nonostante la varietà e il miglioramento negli ultimi anni di tecniche specifiche, la ricostruzione del LCA non garantisce un ripristino completo della biomeccanica del ginocchio ma il suo ausilio è, comunque, fondamentale. Si è visto come una delle cause principali di fallimento sia lo scorretto posizionamento dei tunnel ossei.

Lo studio di questa tesi si è focalizzato, dunque, sulla progettazione di un dispositivo di supporto durante l'intervento. A partire da un modello 3D del ginocchio di un soggetto con lesione del LCA, è stato realizzato un tutore patient specific: esso funge da guida chirurgica mediante due accessi posti nelle parti femorale e tibiale. La fresa, così, è guidata con il corretto orientamento nella realizzazione dei tunnel ossei. Oltre a ridurre i tempi operatori, questo tutore fornisce una maggiore precisione grazie ad una progettazione specifica sulle superfici della gamba del paziente. Il materiale costitutivo, la resina Gray, garantisce al tutore leggerezza e rigidità, con un possibile costo di stampa di 46,50€. La sua realizzazione, inoltre, può avvenire a ridosso di un intervento di ricostruzione, mantenendo la specificità ed evitando errori dovuti a cambiamenti nel tessuto del paziente nell'arco di tempo tra l'infortunio e la data dell'operazione.

La progettazione di questo tutore si basa su una tecnica di ricostruzione All-Inside, in cui l'articolazione del ginocchio viene mantenuta a 90°. Le immagini DICOM a disposizione, però, sono relative ad un ginocchio in estensione ed è stato effettuato, dunque, un modellamento dell'articolazione nella giusta configurazione. In questo

lavoro di tesi si dimostra, perciò, teoricamente un nuovo approccio chirurgico, ma sarebbe interessante disporre di una risonanza magnetica del ginocchio del paziente nella corretta angolazione, in modo da permettere l'effettiva stampa del tutore.

La tecnica All-Inside presa in considerazione permette un'indipendenza tra i due tunnel ossei e, dunque, una ricostruzione più anatomica del legamento. Essa, però, non è l'unica utilizzata. Nella tecnica anteromediale, ad esempio, il tunnel femorale è realizzato con l'articolazione in iperflessione, a 120°. Si potrebbe sviluppare, perciò, in futuro, un tutore chirurgico che permetta, con altrettanta precisione e rigidità, di modificare l'angolazione durante l'intervento, fornendo al chirurgo maggiori opzioni.

Bibliografia e Sitografia

- [1] “Knee - Physiopedia.” <https://www.physio-pedia.com/Knee> (accessed Nov. 16, 2020).
- [2] “Articolazioni: struttura anatomia.” <https://www.my-personaltrainer.it/fisiologia/articolazioni1.html> (accessed Nov. 17, 2020).
- [3] “Lesione legamenti crociati - Dottor Francavilla.” <https://www.cristianfrancavilla.it/lesione-legamenti-crociati/> (accessed Nov. 17, 2020).
- [4] C. Ma, E. Federici, and S. Montagnani, “ASPETTI MORFOFUNZIONALI DEL GINOCCHIO: TRAUMATOLOGIA E RIABILITAZIONE,” 2009.
- [5] “Articolazione del ginocchio - Medicinapertutti.it.” <https://www.medicinapertutti.it/argomento/articolazione-del-ginocchio/> (accessed Nov. 16, 2020).
- [6] Ombregt, “Applied anatomy of the knee,” 2013. doi: 10.1016/B978-0-7020-3145-8.00087-9.
- [7] “Knee Anatomy | Orthogate.” <https://www.orthogate.org/patient-education/knee/knee-anatomy> (accessed Nov. 16, 2020).
- [8] “Knee Anatomy and Significance | Bone and Spine.” <https://boneandspine.com/knee-anatomy/> (accessed Nov. 16, 2020).
- [9] “Knee joint: anatomy, ligaments and movements | Kenhub.” <https://www.kenhub.com/en/library/anatomy/the-knee-joint> (accessed Nov. 16, 2020).
- [10] “Lesioni al menisco e artrosi del ginocchio con docvadis.” https://www.docvadis.it/gustavozanoli/page/guida_medica_personale/la_patologia/lesioni_al_menisco_e_artrosi_del_ginocchio.html (accessed Nov. 18, 2020).
- [11] “Anatomia del ginocchio, menisco, anteriore, posteriore, muscoli, ossa e articolazioni.” <https://www.fisioterapiarubiera.com/anatomia-del-ginocchio/> (accessed Nov. 16, 2020).
- [12] R. Śmigielski, R. Becker, U. Zdanowicz, and B. Ciszek, “Medial meniscus anatomy—from basic science to treatment,” *Knee Surgery, Sport. Traumatol. Arthrosc.*, vol. 23, no. 1, pp. 8–14, 2014, doi: 10.1007/s00167-014-3476-5.

- [13] “Legamento rotuleo | Starbene.it.” <https://www.starbene.it/medicina-a-z/legamento-rotuleo> (accessed Nov. 16, 2020).
- [14] “Knee anatomy in cadavers.” <https://www.anatomynote.com/human-anatomy/cadaver-anatomy/knee-anatomy-in-cadavers/> (accessed Nov. 28, 2020).
- [15] “Knee Joint Anatomy: Bones, Ligaments, Muscles, Tendons, Function.” <https://www.healthpages.org/anatomy-function/knee-joint-structure-function-problems/> (accessed Nov. 16, 2020).
- [16] M. Arcangeli, “Valutazione clinica e funzionale nel breve periodo di pazienti operati di ricostruzione di LCA che utilizzano una nuova macchina per il recupero funzionale degli Ischio Crurali (Safe-Leg).”
- [17] S. Vohra, G. Arnold, S. Doshi, and D. Marcantonio, “Normal MR Imaging Anatomy of the Knee,” *Magnetic Resonance Imaging Clinics of North America*, vol. 19, no. 3. Magn Reson Imaging Clin N Am, pp. 637–653, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.mric.2011.05.012.
- [18] “Trattamento riabilitativo post ricostruzione di Legamento Crociato Anteriore nel calciatore professionista. Protocolli a confronto.” http://www.fisiobrain.com/web/wp-content/uploads/downloads/2013/01/Tesi_Iorio.pdf (accessed Nov. 17, 2020).
- [19] R. Putz, H. Mühlhofer, and Y. Ercan, “Bänder des kniegelenks,” *Orthopade*, vol. 36, no. 7. pp. 612–619, Jul. 2007, doi: 10.1007/s00132-007-1108-1.
- [20] L. Snyder-Mackler and M. J. Axe, “Clinical Orthopaedic Rehabilitation. 2nd ed.,” *J. Bone Jt. Surgery-American Vol.*, vol. 86, no. 12, p. 2799, Dec. 2004, doi: 10.2106/00004623-200412000-00031.
- [21] F. G. Girgis, J. L. Marshall, and A. R. S. Al Monajem, “The cruciate ligaments of the knee joint. Anatomical, functional and experimental analysis,” *CLIN.ORTHOP.*, vol. No. 106, pp. 216–231, Jan. 1975, doi: 10.1097/00003086-197501000-00033.
- [22] “ACL anatomy extension anatomical terminology and flexion arthroscopic terminology.” <https://www.anatomynote.com/human-anatomy/knee-anatomy/acl-anatomy-extension-anatomical-terminology-and-flexion-arthroscopic-terminology/> (accessed Nov. 30, 2020).
- [23] N. Palastanga, D. Field, and R. Soames, *Anatomia del movimento umano. Struttura e funzione*. 2007.
- [24] Vincenzo Pirola, *Cinesiologia. Il movimento umano applicato alla rieducazione e alle attività sportive*. 1996.
- [25] “Le lesioni del legamento crociato anteriore: il fisioterapista risponde! | YouCoach.” <https://www.youcoach.it/it/articolo/le-lesioni-del-legamento-crociato-anteriore-il-fisioterapista-risponde> (accessed Nov. 17, 2020).
- [26] P. Vavken and M. M. Murray, “ACL injury epidemiology,” in *The ACL Handbook: Knee Biology, Mechanics, and Treatment*, Springer New York, 2013, pp. 3–17.
- [27] S. M. Gianotti, S. W. Marshall, P. A. Hume, and L. Bunt, “Incidence of anterior cruciate ligament injury and other knee ligament injuries: A national population-

- based study,” *J. Sci. Med. Sport*, vol. 12, no. 6, pp. 622–627, Nov. 2009, doi: 10.1016/j.jsams.2008.07.005.
- [28] N. A. Mall *et al.*, “Incidence and trends of anterior cruciate ligament reconstruction in the United States,” *Am. J. Sports Med.*, vol. 42, no. 10, pp. 2363–2370, Oct. 2014, doi: 10.1177/0363546514542796.
- [29] T. L. Sanders *et al.*, “Incidence of anterior cruciate ligament tears and reconstruction: A 21-year population-based study,” *Am. J. Sports Med.*, vol. 44, no. 6, pp. 1502–1507, Jun. 2016, doi: 10.1177/0363546516629944.
- [30] “Valutazione clinica e funzionale nel breve periodo di pazienti operati di ricostruzione di LCA che utilizzano una nuova macchina per il recupero funzionale degli Ischio Crurali (Safe-Leg).” <https://www.domenicocrete.it/wp-content/uploads/2016/10/03-a-tesi-Arcangeli-safe-leg.pdf> (accessed Nov. 17, 2020).
- [31] “LESIONE DEL LEGAMENTO CROCIATO ANTERIORE: CAUSE E TRATTAMENTO - Dr. Luca Dei Giudici.” <https://www.ortopediadeigiudici.it/legamento-crociato-anteriore-lca/> (accessed Nov. 17, 2020).
- [32] “L’UTILIZZO DI TEST SULLA KINESIOFOBIA E SULLA FUNZIONALITÀ DEL GINOCCHIO COME VALUTAZIONE INDIRETTA DEL RATE OF FORCE DEVELOPMENT (RFD) IN SOGGETTI OPERATI IN ARTROSCOPIA DI GINOCCHIO PER LESIONE DEL LEGAMENTO CROCIATO ANTERIORE. STUDIO OSSERVAZIONALE.” http://tesi.cab.unipd.it/55947/1/Speranza_Ermanno.pdf (accessed Nov. 17, 2020).
- [33] “Legamento crociato anteriore: lesione o rottura. Sintomi, intervento, riabilitazione ed esercizi.” <https://www.medicina360.com/legamento-crociato-anteriore-lesione-o-rottura.html> (accessed Nov. 17, 2020).
- [34] “Lesione Legamento Crociato Anteriore - Prof. Nicola Portinaro - Ortopedico.” <https://www.nicolaportinaro.it/lesione-legamento-crociato-anteriore/> (accessed Nov. 17, 2020).
- [35] M. Marieswaran, I. Jain, B. Garg, V. Sharma, and D. Kalyanasundaram, “A Review on Biomechanics of Anterior Cruciate Ligament and Materials for Reconstruction,” 2018, doi: 10.1155/2018/4657824.
- [36] “Lesione del legamento crociato anteriore del ginocchio: sintomi e approcci.” <https://www.gibaud.it/sport/lesione-del-legamento-crociato-anteriore-del-ginocchio-sintomi-e-approcci/> (accessed Nov. 17, 2020).
- [37] J. L. Jackson, P. G. O’Malley, and K. Kroenke, “Evaluation of Acute Knee Pain in Primary Care,” *Ann. Intern. Med.*, vol. 139, no. 7, p. 575, Oct. 2003, doi: 10.7326/0003-4819-139-7-200310070-00010.
- [38] “Tests to assess ACL rupture - Clinical Advisor.” <https://www.clinicaladvisor.com/slideshow/slides/tests-to-assess-acl-rupture/> (accessed Nov. 17, 2020).
- [39] F. Cimino, U. Naval Hospital, J. Bradford Scott Volk, and D. Setter, “Anterior

- Cruciate Ligament Injury: Diagnosis, Management, and Prevention,” Oct. 2010. Accessed: Nov. 17, 2020. [Online]. Available: www.aafp.org/afp.
- [40] E. Mulligan, D. McGuffie, ... K. C.-I. journal of, and undefined 2015, “The reliability and diagnostic accuracy of assessing the translation endpoint during the lachman test,” *ncbi.nlm.nih.gov*, Accessed: Nov. 17, 2020. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4325288/>.
- [41] “Glossario Ortopedico - Jerk Test.” http://www.orthoeasy.it/index.php?option=com_seoglossary&view=glossary&catid=1&id=841&Itemid=0 (accessed Nov. 17, 2020).
- [42] “Figure 8 from Current Concepts Review | Semantic Scholar.” <https://www.semanticscholar.org/paper/Current-Concepts-Review-Lubowitz-Bernardini/deeadb455ff368fbb2e2008e1436b35d527ec62d/figure/7> (accessed Nov. 17, 2020).
- [43] “The Pivot Shift : JAAOS - Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons.” https://journals.lww.com/jaaos/Fulltext/2008/12000/The_Pivot_Shift.1.aspx (accessed Nov. 17, 2020).
- [44] “PREMIUM MEDICA: Ginocchio: lesioni LCA.” <https://www.premiummedica.it/dottor-marco-patacchini.php?id=1051&l=it> (accessed Nov. 17, 2020).
- [45] L. Yao, A. Gentili, L. Petrus, and J. K. Lee, “Partial ACL rupture: an MR diagnosis?,” *Skelet. Radiol. A J. Radiol. Pathol. Orthop.*, vol. 24, no. 4, pp. 247–251, May 1995, doi: 10.1007/BF00198407.
- [46] “Legamento crociato anteriore: itinerario e durata del percorso di cure.” <https://giusepppacelli.it/diagnosi-rottura-legamento-crociato-anteriore> (accessed Nov. 17, 2020).
- [47] “Legamento crociato anteriore rotto: quali test? | FisioScience.” <https://www.fisioscience.it/blog/legamento-crociato-anteriore-rotto-quali-test/> (accessed Nov. 17, 2020).
- [48] K. Li, J. Du, L. X. Huang, L. Ni, T. Liu, and H. L. Yang, “The diagnostic accuracy of magnetic resonance imaging for anterior cruciate ligament injury in comparison to arthroscopy: A meta-analysis,” *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, Dec. 2017, doi: 10.1038/s41598-017-08133-4.
- [49] “Legamento Crociato Anteriore (LCA).” <https://www.pierpaolomariani.it/legamento-crociato-anteriore> (accessed Nov. 17, 2020).
- [50] “Crociato rotto: cause e opzioni terapeutiche.” https://www.bauerfeind.it/it_it/appfondimenti/diagnosi-e-terapia/ginocchio-e-rotula/crociato-rotto/ (accessed Nov. 17, 2020).
- [51] “Rottura del legamento crociato anteriore (LCA) - Dolore al Ginocchio | Isokinetic.” <https://www.isokinetic.com/it/guida/dolore-al-ginocchio/infortuni-e-patologie/rottura-del-legamento-crociato-anteriore->

- lca_/445/29303629/ginocchio/1065285/ (accessed Nov. 17, 2020).
- [52] “LESIONE DEL LEGAMENTO CROCIATO ANTERIORE (LCA): RICHIEDE UN INTERVENTO CHIRURGICO? – dott. Alberto Vascellari.” <https://www.albertovascellari.it/lesione-del-legamento-crociato-anteriore-lca-richiede-un-intervento-chirurgico/> (accessed Nov. 17, 2020).
- [53] “Ricostruzione del ligamento crociato anteriore: quale scelta per l’innesto?” <https://www.protesiancaeginocchio.com/blog/2013/09/02/Ricostruzione-del-legamento-crociato-anteriore-quale-scelta-per-linnesto.aspx> (accessed Nov. 17, 2020).
- [54] “Intervento di ricostruzione legamento crociato anteriore.” <https://www.chirurgiaortopedicamantova.it/patologie/dettaglio/intervento-di-ricostruzione-legamento-crociato-ant/> (accessed Nov. 17, 2020).
- [55] “Ricostruzione del legamento crociato anteriore con tendini del gracile e semitendinoso e con tendine rotuleo.” <http://www.gabrieletavolieri.it/index.php/pubblicazioni-del-dott-gabriele-tavolieri-su-ortopedia-e-traumatologia-chirurgia-protesica-e-artroscopica/164-ricostruzione-del-legamento-crociato-anteriore-con-tendini-del-gracile-e-semitendinoso-e-con-tendine-rotuleo> (accessed Nov. 17, 2020).
- [56] “Ortopedia web Legamento crociato anteriore - ricostruzione - intervento.” <https://www.ortopediaweb.net/web/legamento-crociato-anteriore/> (accessed Nov. 17, 2020).
- [57] “OPERAZIONE LEGAMENTO CROCIATO: Tecniche - Fabio Marino.” <https://www.marinofabio.it/operazione-legamento-crociato-22/9529/> (accessed Nov. 17, 2020).
- [58] “TECNICHE CHIRURGICHE ATTUALMENTE IN USO. ” [http://www.doctoral.it/lezioni/ortopedia/Tecniche chirurgiche LCA.pdf](http://www.doctoral.it/lezioni/ortopedia/Tecniche%20chirurgiche%20LCA.pdf) (accessed Nov. 17, 2020).
- [59] “Ortopedia web tendine quadricipitale - Ortopedia web.” <https://www.ortopediaweb.net/web/legamento-crociato-anteriore/fig6/> (accessed Nov. 17, 2020).
- [60] G. Hailotte, A. Hardy, B. Granger, T. Noailles, and F. Khiami, “Early strength recovery after anterior cruciate ligament reconstruction using the fascia lata,” *Orthop. Traumatol. Surg. Res.*, vol. 103, no. 7, pp. 1021–1025, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.otsr.2017.07.013.
- [61] Y. Liu *et al.*, “First High-Density Linkage Map and QTL Fine Mapping for Growth-Related Traits of Spotted Sea bass (*Lateolabrax maculatus*),” *Mar. Biotechnol.*, vol. 22, no. 4, pp. 526–538, Aug. 2020, doi: 10.1007/s10126-020-09973-4.
- [62] D. H. R. Jenkins, “The repair of cruciate ligaments with flexible carbon fibre. A longer term study of the induction of new ligaments and of the fate of the implanted carbon,” *J. Bone Jt. Surg. - Ser. B*, vol. 60 B, no. 4, pp. 520–522, 1978, doi: 10.1302/0301-620x.60b4.711800.
- [63] T. Nau, P. Lavoie, and N. Duval, “A new generation of artificial ligaments in

- reconstruction of the anterior cruciate ligament,” *J. Bone Joint Surg. Br.*, vol. 84-B, no. 3, pp. 356–360, Apr. 2002, doi: 10.1302/0301-620x.84b3.0840356.
- [64] R. Mascarenhas, P. M.-M. J. of M. MJM, and undefined 2008, “Anterior cruciate ligament reconstruction: a look at prosthetics-past, present and possible future,” *ncbi.nlm.nih.gov*, Accessed: Nov. 17, 2020. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/pmc2322926/>.
- [65] M. Caforio and P. Maniscalco, “La ricostruzione del LCA con legamento sintetico: vantaggi, svantaggi, limitiACL reconstruction with synthetic graft ligament: advantages, disadvantages, limits,” *LO SCALPELLO-OTODI Educ.*, vol. 30, no. 2, pp. 82–85, Jul. 2016, doi: 10.1007/s11639-016-0157-9.
- [66] “Crociato rotto: interventi di riparazione del crociato anteriore.” <https://www.chirurgiarticolare.it/ginocchio/intervento-chirurgia-artroscopia/31-lesioni-del-legamento-crociato-anteriore.html> (accessed Nov. 17, 2020).
- [67] “Legamento Crociato Anteriore - Ricostruzione non anatomica: tecnica a singolo o doppio filamento?” <https://www.healthitalynet.it/index.php/news-e-approfondimento/recensioni-di-articoli/item/247-legamento-crociato-anteriore-ricostruzione-non-anatomica-tecnica-a-singolo-o-doppio-filamento> (accessed Nov. 17, 2020).
- [68] “Ricostruzione del legamento crociato anteriore con legamento artificiale LARS: follow-up a 12 anni.” <https://core.ac.uk/download/pdf/79623135.pdf> (accessed Nov. 17, 2020).
- [69] “Anterolateral Ligament (ALL).” <https://pt.slideshare.net/hiraharamd/anterolateral-ligament-all/14> (accessed Nov. 17, 2020).
- [70] G. Santoro and M. A. Rosa, “LA RICOSTRUZIONE DEL LCA CON LA TECNICA A DOPPIO FASCIO: RISULTATI PRELIMINARI Antibiotic elution from bone cements View project.” Accessed: Nov. 17, 2020. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/268358291>.
- [71] “La ricostruzione del Legamento Crociato Anteriore: singolo e doppio fascio con docvadis.” https://www.docvadis.it/giorgiobellina/page/guida_medica_personale/i_trattamenti/la_ricostruzione_del_legamento_crociato_anteriore_singolo_e_doppio_fascio.html (accessed Nov. 17, 2020).
- [72] G. Santoro and M. A. Rosa, “LA RICOSTRUZIONE DEL LCA CON LA TECNICA A DOPPIO FASCIO: RISULTATI PRELIMINARI Antibiotic elution from bone cements View project.” Accessed: Nov. 17, 2020. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/268358291>.
- [73] “Ricostruzione del legamento crociato anteriore | Artros.” https://artros.it/trattamenti_operatori/ricostruzione_del_legamento_crociato_anteriore/ (accessed Nov. 17, 2020).
- [74] C. Chen, T. Chuang, K. Wang, W. C.-K. Surgery, undefined Sports, and undefined 2006, “Arthroscopic anterior cruciate ligament reconstruction with quadriceps tendon autograft: clinical outcome in 4–7 years,” *Springer*, Accessed: Nov. 17, 2020.

- [Online]. Available: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00167-006-0111-0.pdf>.
- [75] M. Yunes, J. C. Richmond, E. A. Engels, and L. A. Pincweski, "Patellar versus hamstring tendons in anterior cruciate ligament reconstruction: A meta-analysis," *Arthroscopy*, vol. 17, no. 3, pp. 248–257, 2001, doi: 10.1053/jars.2001.21242.
- [76] M. Pombo, W. Shen, & F. F.-A. T. J. of A., and undefined 2008, "Anatomic double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: where are we today?" *Elsevier*, Accessed: Nov. 17, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0749806308004337>.
- [77] C. van Eck, Z. Working, and F. Fu, "Current concepts in anatomic single- and double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction," *Phys. Sportsmed.*, vol. 39, no. 2, pp. 140–148, 2011, doi: 10.3810/psm.2011.05.1905.
- [78] T. Iriuchishima, K. Ryu, T. Okano, M. Suruga, S. Aizawa, and F. H. Fu, "The evaluation of muscle recovery after anatomical single-bundle ACL reconstruction using a quadriceps autograft," *Knee Surgery, Sport. Traumatol. Arthrosc.*, vol. 25, no. 5, pp. 1449–1453, 2017, doi: 10.1007/s00167-016-4124-z.
- [79] V. Musahl *et al.*, "Varying femoral tunnels between the anatomical footprint and isometric positions: Effect on kinematics of the anterior cruciate ligaments-reconstructed knee," *Am. J. Sports Med.*, vol. 33, no. 5, pp. 712–718, May 2005, doi: 10.1177/0363546504271747.
- [80] J. Dargel, R. Schmidt-Wiethoff, S. Fischer, K. Mader, J. Koebeke, and T. Schneider, "Femoral bone tunnel placement using the transtibial tunnel or the anteromedial portal in ACL reconstruction: A radiographic evaluation," *Knee Surgery, Sport. Traumatol. Arthrosc.*, vol. 17, no. 3, pp. 220–227, 2009, doi: 10.1007/s00167-008-0639-2.
- [81] A. Mehta *et al.*, "Effects of anteromedial portal versus transtibial ACL tunnel preparation on contact characteristics of the graft and the tibial tunnel aperture," *CiOS Clin. Orthop. Surg.*, vol. 11, no. 1, pp. 52–59, Mar. 2019, doi: 10.4055/cios.2019.11.1.52.
- [82] "Arthrex - Medial Portal Femoral Socket Preparation." <https://www.arthrex.com/knee/medial-portal-femoral-socket-preparation/related-science> (accessed Nov. 17, 2020).
- [83] B. N. Robin, S. S. Jani, S. C. Marvil, J. B. Reid, C. K. Schillhammer, and J. H. Lubowitz, "Advantages and Disadvantages of Transtibial, Anteromedial Portal, and Outside-In Femoral Tunnel Drilling in Single-Bundle Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review," *Arthrosc. - J. Arthrosc. Relat. Surg.*, vol. 31, no. 7, pp. 1412–1417, 2015, doi: 10.1016/j.arthro.2015.01.018.
- [84] E. Monaco *et al.*, "In–out versus out–in technique for ACL reconstruction: a prospective clinical and radiological comparison," *J. Orthop. Traumatol.*, vol. 18, no. 4, pp. 335–341, Dec. 2017, doi: 10.1007/s10195-017-0458-7.
- [85] D. De Sa *et al.*, "All-Inside Anterior Cruciate Ligament Reconstruction-A Systematic Review of Techniques, Outcomes, and Complications," *J. Knee Surg.*, vol. 31, no. 9, pp. 895–904, 2018, doi: 10.1055/s-0038-1627446.

- [86] “Legamento crociato anteriore. L’operazione - Dottor Claudio Manzini.” <https://www.claudiomanzini.it/news/legamento-crociato-anteriore-loperazione/> (accessed Nov. 17, 2020).
- [87] L. Tibor, P. H. Chan, T. T. Funahashi, R. Wyatt, G. B. Maletis, and M. C. S. Inacio, “Surgical technique trends in primary ACL reconstruction from 2007 to 2014,” *J. Bone Jt. Surg. - Am. Vol.*, vol. 98, no. 13, pp. 1079–1089, Jul. 2016, doi: 10.2106/JBJS.15.00881.
- [88] G. Milano, P. D. Mulas, F. Ziranu, S. Piras, A. Manunta, and C. Fabbriani, “Comparison Between Different Femoral Fixation Devices for ACL Reconstruction With Doubled Hamstring Tendon Graft: A Biomechanical Analysis,” *Arthrosc. - J. Arthrosc. Relat. Surg.*, vol. 22, no. 6, pp. 660–668, Jun. 2006, doi: 10.1016/j.arthro.2006.04.082.
- [89] B. DI Paola, E. aDrIaNI SportClinique Casa di Cura, and M. Dei, “FISSAZIONE FEMORALE NELLA RICOSTRUZIONE DEL LCA: QUALE SISTEMA NELLA TECNICA ANTERO-MEDIALE?”
- [90] R. Faccini, A. Artioli, M. Manfredini, M. P.-G. I. di, and undefined 2003, “Fissazione distale dell’innesto osteotendineo con tecnica RIGID-FIX: risultati e metodica Tibial fixation of patellar tendon allograft with RIGID-FIX technique: methodics and results.” Accessed: Nov. 17, 2020. [Online]. Available: <https://www.giot.it/wp-content/uploads/2015/06/faccini1.pdf>.
- [91] “Rottura del crociato anteriore – Dottor Enrico Visonà.” <https://enicovisona.it/rottura-del-crociato-anteriore/> (accessed Nov. 18, 2020).
- [92] Arthrex, “Bio-TransFix ACL Reconstruction Surgical Technique,” 2003. Accessed: Nov. 18, 2020. [Online]. Available: <papers2://publication/uuid/826B2278-F2AB-4380-B0E8-EFFBB69D78D8>.
- [93] “RICOSTRUZIONE DEL L.C.A.: TECNICHE E SISTEMI DI FISSAZIONE.” https://www.alessandrotripodo.it/images/LCA_GIOT_2003.pdf (accessed Nov. 17, 2020).
- [94] S. M. Howell and M. L. Hull, “Structural properties of six tibial fixation methods for anterior cruciate ligament soft tissue grafts,” *Artic. Am. J. Sport. Med.*, vol. 27, no. 1, pp. 35–43, 1999, doi: 10.1177/03635465990270011401.
- [95] J. Kartus, L. Magnusson, S. Stener, S. B.-K. Surgery, undefined Sports, and undefined 1999, “Complications following arthroscopic anterior cruciate ligament reconstruction A 2–5-year follow-up of 604 patients with special emphasis on anterior knee pain,” *Springer*, Accessed: Nov. 17, 2020. [Online]. Available: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s001670050112.pdf>.
- [96] A. Weiler, R. F. G. Hoffmann, A. C. Stähelin, H. J. Bail, C. J. Siepe, and N. P. Südkamp, “Hamstring Tendon Fixation Using Interference Screws: A Biomechanical Study in Calf Tibial Bone.” Accessed: Nov. 17, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0749806398701173>.
- [97] “IL LEGAMENTO CROCIATO ANTERIORE: LO STATO DELL’ARTE CIRCA IL TRATTAMENTO, LA RIABILITAZIONE E LA VALUTAZIONE DEL RECUPERO FUNZIONALE.”

- http://www.sardegnaicercche.it/documenti/13_238_20110616194331.pdf (accessed Nov. 17, 2020).
- [98] H. Tohyama, K. Y.-K. Surgery, S. Traumatology, undefined Arthroscopy, and undefined 1998, “Significance of graft tension in anterior cruciate ligament reconstruction Basic background and clinical outcome,” *Springer*, Accessed: Nov. 17, 2020. [Online]. Available: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s001670050220.pdf>.
- [99] H. Koga, T. Muneta, K. Yagishita, ... T. W.-... : T. J. of, and undefined 2015, “Effect of initial graft tension on knee stability and graft tension pattern in double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction,” *Elsevier*, Accessed: Nov. 17, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0749806315002212>.
- [100] T. Mae, K. Shino, K. Yoneda, Y. Tachibana, ... T. O.-J. of O., and undefined 2020, “Residual graft tension after graft fixation in anterior cruciate ligament reconstruction: Manual vs tensioning boot techniques,” *Elsevier*, Accessed: Nov. 17, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0949265820300166>.
- [101] “Mechanical Graft Tensioning in Posterior Cruciate Ligament Reconstruction | Musculoskeletal Key.” <https://musculoskeletalkey.com/mechanical-graft-tensioning-in-posterior-cruciate-ligament-reconstruction/> (accessed Nov. 17, 2020).
- [102] S. Taketomi, H. Inui, K. Tahara, N. Shirakawa, S. Tanaka, and T. Nakagawa, “Effects of initial graft tension on femoral tunnel widening after anatomic anterior cruciate ligament reconstruction using a bone–patellar tendon–bone graft,” *Arch. Orthop. Trauma Surg.*, vol. 137, no. 9, pp. 1285–1291, Sep. 2017, doi: 10.1007/s00402-017-2728-5.
- [103] M. Goertzen, “Donor tissue choices in ACL revision,” *Sports Med. Arthrosc.*, vol. 5, no. 2, pp. 128–135, 1997, doi: 10.1097/00132585-199700520-00007.
- [104] D. Bardelli, M. G. Danovaro, L. De Sanctis, C. Pesce, D. Comba Ospedale, and K. Torino, “LA CHIRURGIA DI REVISIONE NEI FALLIMENTI DOPO RICOSTRUZIONE ARTROSCOPICA DEL LCA.”
- [105] “Normal Alignment of Lower Limb - Axes and Orientation | Bone and Spine.” <https://boneandspine.com/normal-alignment-of-lower-limb/> (accessed Feb. 14, 2021).
- [106] “Intra-articular landmarks for anterior cruciate ligament reconstructions: a review,” 2010, doi: 10.2217/IJR.10.97.
- [107] S. H. Kim, H. J. Lee, Y. B. Park, H. S. Jeong, and C. W. Ha, “Anterior Cruciate Ligament Tibial Footprint Size as Measured on Magnetic Resonance Imaging: Does It Reliably Predict Actual Size?,” *Am. J. Sports Med.*, vol. 46, no. 8, pp. 1877–1884, 2018, doi: 10.1177/0363546518767874.
- [108] F. Castoldi, R. Rossi, A. Marmotti, M. Assam, D. Blonna, and P. Rossi, “Ricostruzione del legamento crociato anteriore monofascio con tendine rotuleo o gracile semitendinoso,” *Tech. Orthop.*, vol. 3, no. 3, pp. 1–6, 2005, doi: 10.1016/S2211-0801(07)70029-8.

- [109] G. Cerulli, G. Zamarra, F. Vercillo, and F. Pelosi, “ACL reconstruction with ‘the original all-inside technique,’” *Knee Surgery, Sport. Traumatol. Arthrosc.*, vol. 19, no. 5, pp. 829–831, 2011, doi: 10.1007/s00167-010-1371-2.
- [110] “BSM-12-Antropometria e proprietà inerziali - StuDocu.”
<https://www.studocu.com/en-us/document/politecnico-di-milano/bioingegneria-del-sistema-motorio/appunti-di-lezione/bsm-12-antropometria-e-proprietà-inerziali/1537694/view> (accessed Mar. 16, 2021).