



**Universitat Autònoma  
de Barcelona**

**FACULTAT DE MEDICINA**  
Departament de Cirurgia

---

**EVALUACIÓN DE LA FIJACIÓN FEMORAL  
EN LA RECONSTRUCCIÓN  
DEL LIGAMENTO CRUZADO ANTERIOR**

---

ESTUDIO EXPERIMENTAL EN MODELO CADAVÉRICO

TESIS DOCTORAL:

**Raúl Torres Claramunt**

Barcelona, 2014

DIRECTORES:

**Enric Cáceres Palou**

**Joan Carles Monllau García**

**Pablo Eduardo Gelber Ghertner**



La tesis doctoral titulada;

EVALUACIÓN DE LA FIJACIÓN FEMORAL EN LA RECONSTRUCCIÓN DEL LIGAMENTO CRUZADO ANTERIOR. ESTUDIO EXPERIMENTAL EN MODELO CADAVERÍCO

y presentada por el doctorando;

**RAÚL TORRES CLARAMUNT**

Está realizada bajo el modelo de compendio de publicaciones cumpliendo la normativa de la Universitat Autònoma de Barcelona para este tipo de tesis doctorales.

Referencia bibliográfica de los artículos incluidos;

*Gelber PE, Reina F, **Torres R**, Pelfort X, Tey M, Monllau JC. Anatomic single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction from the anteromedial portal: evaluation of transverse femoral fixation in a cadaveric model. Arthroscopy. 2010 May; 26(5): 651-7.*

*Gelber PE, Reina F, **Torres R**, Monllau JC. Effect of femoral tunnel length on the safety of anterior cruciate ligament graft fixation using cross-pin technique: a cadaveric study. Am J Sports Med. 2010 Sep; 38(9):1877-84.*

*Gelber PE, Erquicia J, Abat F, **Torres R**, Pelfort X, Rodríguez-Baeza A, Alomar X, Monllau JC. Effectiveness of a footprint guide to establish an anatomic femoral tunnel in anterior cruciate ligament reconstruction: computed tomography evaluation in a cadaveric model. Arthroscopy. 2011 Jun; 27(6):817-24.*



*“Cree a aquellos que buscan la verdad.  
Duda de los que la encuentran”*

*André Gide*



Als meus pares,







## AGRADECIMIENTOS

---

**Als meus pares**, per ser els grans responsables que hui puga estar jo ací.

**A tota la meua família.**

**A Puçol** i tota la gent que allí tinc. Ma casa.

**A Gemma** per estar sempre ahí, ets el meu suport.

**A tots els docents** que he tingut en la meua formació acadèmica, tots tenen una part de responsabilitat en que jo puga haver arribat fins ací.

**Al Dr. Cáceres, al Dr. Puig, al Dr. Monllau i al Dr. Pelfort**, referents durant tota la meua formació professional.

**Al servei de COT del Parc de Salut Mar, Hospital del Mar i de la Esperança**; es un plaer anar a treballar cada dia amb tots vosaltres. Gràcies per incentivar-me en l'estudi i coneixement de la nostra especialitat.

**Al grup de residents de COT del Parc de Salut Mar** amb els que he coincidit tots aquests anys. Gràcies a tots vosaltres.

**Gracias Pablo**, por tu trabajo en esta tesis y por mostrarme tu pasión por el estudio de la rodilla.



# ÍNDICE

|                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....                                                                                                                                                                 | 15 |
| <b>1.1 LIGAMENTO CRUZADO ANTERIOR</b> .....                                                                                                                                                  | 17 |
| 1.1.1 INTRODUCCIÓN.....                                                                                                                                                                      | 17 |
| 1.1.2 HISTORIA.....                                                                                                                                                                          | 17 |
| 1.1.3 EMBRIOLOGÍA.....                                                                                                                                                                       | 18 |
| 1.1.4 ANATOMÍA.....                                                                                                                                                                          | 19 |
| 1.1.5 HISTOLOGÍA.....                                                                                                                                                                        | 20 |
| 1.1.6 FUNCIÓN.....                                                                                                                                                                           | 20 |
| 1.1.7 HAZ ANTEROMEDIAL Y HAZ POSTEROLATERAL.....                                                                                                                                             | 21 |
| 1.1.8 ANATOMÍA POSTEROLATERAL RODILLA.....                                                                                                                                                   | 22 |
| <br>                                                                                                                                                                                         |    |
| <b>1.2 LESIÓN Y REPARACIÓN DEL LIGAMENTO CRUZADO ANTERIOR</b> .....                                                                                                                          | 25 |
| 1.2.1 PREVALENCIA.....                                                                                                                                                                       | 25 |
| 1.2.2 MECANISMO LESIONAL.....                                                                                                                                                                | 25 |
| 1.2.3 EXPLORACIÓN FÍSICA.....                                                                                                                                                                | 25 |
| 1.2.4 PRUEBAS DE IMAGEN Y DE ESTABILIDAD.....                                                                                                                                                | 26 |
| 1.2.5 HISTORIA DE LA RECONSTRUCCIÓN DEL LIGAMENTO<br>CRUZADO ANTERIOR.....                                                                                                                   | 27 |
| 1.2.6 TIPOS INJERTOS.....                                                                                                                                                                    | 29 |
| 1.2.7 VARIACIONES TÉCNICAS.....                                                                                                                                                              | 30 |
| 1.2.8 EVOLUCIÓN DE LA UBICACIÓN DEL TÚNEL FEMORAL.....                                                                                                                                       | 32 |
| 1.2.9 FUNDAMENTO DE LOS TRABAJOS.....                                                                                                                                                        | 35 |
| <br>                                                                                                                                                                                         |    |
| <b>1.3 HIPÓTESIS DE TRABAJO</b> .....                                                                                                                                                        | 38 |
| <br>                                                                                                                                                                                         |    |
| <b>2. MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....                                                                                                                                                           | 39 |
| <b>TRABAJO nº1:</b> Anatomic single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction<br>from the anteromedial portal: evaluation of transverse femoral fixation<br>in a cadaveric model..... | 41 |
| <b>TRABAJO nº2:</b> Effect of femoral tunnel length on the safety of anterior<br>cruciate ligament graft fixation using cross-pin technique:<br>a cadaveric study.....                       | 46 |

**TRABAJO n°3:** Effectiveness of a footprint guide to establish an anatomic femoral tunnel in anterior cruciate ligament reconstruction: computed tomography evaluation in a cadaveric model ..... 51

**3. RESULTADOS** ..... 57

**TRABAJO n°1:** Anatomic single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction from the anteromedial portal: evaluation of transverse femoral fixation in a cadaveric model ..... 59

**TRABAJO n°2:** Effect of femoral tunnel length on the safety of anterior cruciate ligament graft fixation using cross-pin technique: a cadaveric study ..... 63

**TRABAJO n°3:** Effectiveness of a footprint guide to establish an anatomic femoral tunnel in anterior cruciate ligament reconstruction: computed tomography evaluation in a cadaveric model ..... 67

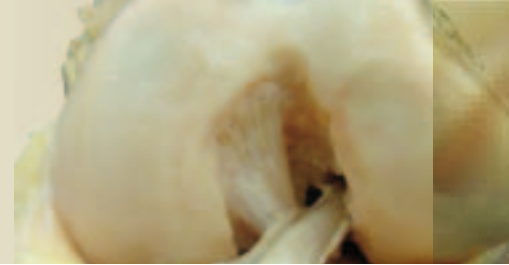
**4. DISCUSIÓN** ..... 73

**TRABAJO n°1 Y 2:**

Anatomic single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction from the anteromedial portal: evaluation of transverse femoral fixation in a cadaveric model ..... 75

Effect of femoral tunnel length on the safety of anterior cruciate ligament graft fixation using cross-pin technique: a cadaveric study ..... 75

**TRABAJO n°3:** Effectiveness of a footprint guide to establish an anatomic femoral tunnel in anterior cruciate ligament reconstruction: computed tomography evaluation in a cadaveric model ..... 79



|                                                                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>5. CONCLUSIONES</b> .....                                                                                                                                                                           | 81  |
| <b>TRABAJO n°1:</b> Anatomic single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction from the anteromedial portal: evaluation of transverse femoral fixation in a cadaveric model .....                | 83  |
| <b>TRABAJO n°2:</b> Effect of femoral tunnel length on the safety of anterior cruciate ligament graft fixation using cross-pin technique: a cadaveric study .....                                      | 84  |
| <b>TRABAJO n°3:</b> Effectiveness of a footprint guide to establish an anatomic femoral tunnel in anterior cruciate ligament reconstruction: computed tomography evaluation in a cadaveric model ..... | 85  |
| <b>6. COPIA DE LOS TRABAJOS</b> .....                                                                                                                                                                  | 87  |
| <b>TRABAJO n°1:</b> Anatomic single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction from the anteromedial portal: evaluation of transverse femoral fixation in a cadaveric model .....                | 89  |
| <b>TRABAJO n°2:</b> Effect of femoral tunnel length on the safety of anterior cruciate ligament graft fixation using cross-pin technique: a cadaveric study .....                                      | 96  |
| <b>TRABAJO n°3:</b> Effectiveness of a footprint guide to establish an anatomic femoral tunnel in anterior cruciate ligament reconstruction: computed tomography evaluation in a cadaveric model ..... | 104 |
| <b>7. BIBLIOGRAFÍA</b> .....                                                                                                                                                                           | 113 |





# INTRODUCCIÓN





# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 LIGAMENTO CRUZADO ANTERIOR

### 1.1.1 INTRODUCCIÓN

El ligamento cruzado anterior (LCA) es un ligamento que se encuentra situado en la articulación de la rodilla y actúa como un estabilizador de la misma, limitando el desplazamiento anterior y la rotación de la tibia sobre el fémur. El LCA posee además un importante rol en la función propioceptiva de la rodilla debido a las múltiples terminaciones nerviosas que presenta. A finales del siglo XIX se describieron las primeras cirugías dirigidas a la reparación del LCA, pero ha sido en las últimas dos décadas cuando el número de estas cirugías ha aumentado de manera muy significativa. El conocimiento más exhaustivo de la anatomía y función del LCA así como una mejor comprensión de la historia natural de esta lesión han sido los principales responsables en este incremento en el número de cirugías. Proporcionalmente a este aumento, también se han incrementado significativamente el número de estudios dirigidos a conocer y comprender mejor la biomecánica, función y reconstrucción de este ligamento. Actualmente el estudio del LCA representa uno de los campos dentro de la cirugía ortopédica que acumula más artículos científicos publicados anualmente.

### 1.1.2 HISTORIA


La primera referencia anatómica del LCA se remonta a un papiro egipcio del año 3000 a.C. Posteriormente, Hipócrates (460-370 a.C.) describió un episodio de subluxación de una rodilla humana debido a la lesión de este ligamento. Fue Claudio Galeno de Pérgamo (131-201 a.C.) quien primero dio nombre a dicha estructura a la cual denominó "*ligamentum genu cruciata*" (1). Durante muchos decenios el tratamiento y estudio de la lesión de este ligamento no fue prioritaria dentro del campo de la ortopedia, de manera que pasaron unos 2000 años sin avances significativos en el conocimiento de esta estructura anatómica. En 1836 se publicó el tratado "*Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge*" por los hermanos Weber, convirtiéndose en el gran referente en la anatomía y función de los ligamentos cruzados de la rodilla (2). Estos dos hermanos

sugirieron que el LCA estaba formado por dos haces de fibras funcionalmente independientes. A partir de aquí se fueron produciendo numerosos avances en el conocimiento del LCA. William Hey (1736-1818) describió la sensación que posteriormente pasaría a ser la prueba diagnóstica del “pivot shift”. En 1845 Amadeé Bonnet de Lyon publicó su “*Traité des maladies des articulations*” donde describía los signos indicativos de una rotura aguda del LCA. En 1875, el médico griego George Noulis describió, en su tesis titulada “*Knee sprains*”, una detallada descripción de lo que hoy se conoce como el test de Lachman. El epónimo de este test fue atribuido en 1976 a John Lachman, basándose en los descubrimientos de Noulis. (3).

Inicialmente el tratamiento conservador fue el tratamiento de elección para esta lesión. Las rodillas de estos pacientes eran inmovilizadas durante meses obteniendo en muchos casos una correcta funcionalidad. En 1900, William Battle publicó una reparación abierta del LCA usando suturas de seda (4). Sin embargo, 3 años después A.W. Mayo-Robson publicó un caso que se había intervenido 5 años antes, destacando una correcta evolución del paciente (5). Es a este último autor al que se le atribuye por tanto la primera *reparación* del LCA. En cambio, la primera *reconstrucción* del LCA se atribuye a Ernest W. Hey Groves en 1917 a partir de una plastia obtenida de la banda iliotibial (6). A partir de aquí, y sobre todo en la segunda mitad del siglo XX, numerosos avances técnicos llevados a cabo por la industria y los propios cirujanos han ido modificando y mejorando el procedimiento quirúrgico (7).

### 1.1.3 EMBRIOLOGÍA

La rodilla procede del mesénquima femoral y tibial y se forma a partir de la cuarta semana de gestación. En este momento los fibroblastos inician su alineación formando el eje inicial del LCA. A las 9 semanas de gestación el LCA está compuesto de numerosos fibroblastos inmaduros capaces de producir matriz extracelular. Después de la 20ª semana, el desarrollo consiste en un marcado crecimiento con



pequeños cambios en la forma (8). Sobre la diferenciación de los diferentes haces del LCA, en un trabajo artroscópico realizado por Tena-Arregui (9), se aprecia la presencia de estos haces entre las semana 24ª y 40ª de gestación pero parecen tener una disposición más paralela que cuando se comparan con la orientación del LCA del adulto.

#### **1.1.4 ANATOMÍA**

El LCA, al igual que el ligamento cruzado posterior (LCP), es un ligamento intracapsular y extrasinovial ya que está recubierto de una membrana sinovial (10). El LCA se origina en la cara medial del cóndilo femoral externo y desciende anterior y medialmente hasta su inserción en la meseta tibial. La inserción femoral se sitúa por detrás de la escotadura intercondílea en forma semicircular. La porción anterior de la inserción es prácticamente recta y la porción posterior es convexa. Durante su trayecto descendente el LCA sufre una rotación externa hasta su inserción tibial. Esta inserción es oblicua en la cara lateral de la tuberosidad tibial interna a nivel de la fosa intercondílea. La longitud media del LCA es de 38 mm y su anchura media es de 11 mm.

El LCA se divide en dos haces que toman su nombre de la inserción tibial: el haz antero-medial (AM) y el haz posterolateral (PL). El haz AM se inserta en la región más anterior y medial de la inserción tibial y en la región más cefálica de la huella femoral. Por el contrario, el haz PL se inserta más posteriormente en la tibia y más anterior y lateral en el fémur. Esta división de haces sería más funcional que anatómica según algunos autores (11).

Los resultados obtenidos por Odensten y Gillquist en cadáver mostraron que el LCA no es un ligamento uniforme en su diámetro. La inserción en el cóndilo femoral lateral es oval con un diámetro máximo de  $18 \pm 2$  milímetros y un diámetro mínimo de  $11 \pm 2$


milímetros. La distancia desde el punto central del área de inserción femoral del LCA a la pared posterior del cóndilo es de  $15,3\pm 3$  mm. La inserción en la tibia también tiene una morfología oval con un eje máximo mayor de  $17\pm 3$  y mínimo menor de  $11\pm 2$ . Esta inserción tiene dos estructuras con las que se relaciona íntimamente: la inserción anterior del menisco lateral, que está alineada con el origen del fascículo anterolateral del LCA, y el LCP, cuyo borde anterior estaría situado unos 7 mm posterior a la inserción tibial del LCA. (11-13).

### **1.1.5 HISTOLOGÍA**

El LCA está formado por una amplia red de colágeno que representa aproximadamente dos tercios de su peso en seco. La mayor parte de este colágeno es de tipo I (90%) y el restante equivale al tipo III (10%). El colágeno se dispone en múltiples haces de fibras de  $20\ \mu\text{m}$  de anchura agrupados en fascículos de  $20\ \mu\text{m}$  a  $400\ \mu\text{m}$  de diámetro (10). El tercio restante del peso seco del LCA está formado por fibroblastos y otras sustancias como elastina (<5%) y proteoglicanos (1%). El agua representa el 60% del peso neto en condiciones fisiológicas. Las inserciones óseas de los ligamentos y tendones presentan una estructura con fibras de colágeno que se continúan directamente con fibras situadas en el seno del hueso.

### **1.1.6 FUNCIÓN**

El LCA actúa como principal estabilizador estático de la rodilla, impidiendo la traslación anterior de la tibia sobre el fémur, alcanzando el 86% de la fuerza que se opone a dicho movimiento (10). Como se ha comentado previamente, algunos autores como Odensten (11) no encuentran una separación anatómica entre los dos haces. Sin embargo, otros como Amis y cols. (14), incluso sugirieron la presencia de un tercer haz que se denominaría haz intermedio. La diferenciación del LCA en dos fascículos funcionales, el AM y el PL, parece ser una simplificación de la anatomía del LCA, pero esta descripción de las fibras del LCA ha sido universalmente aceptada como la mejor y más pragmática descripción anatómica y sobre todo funcional de este ligamento. Además,



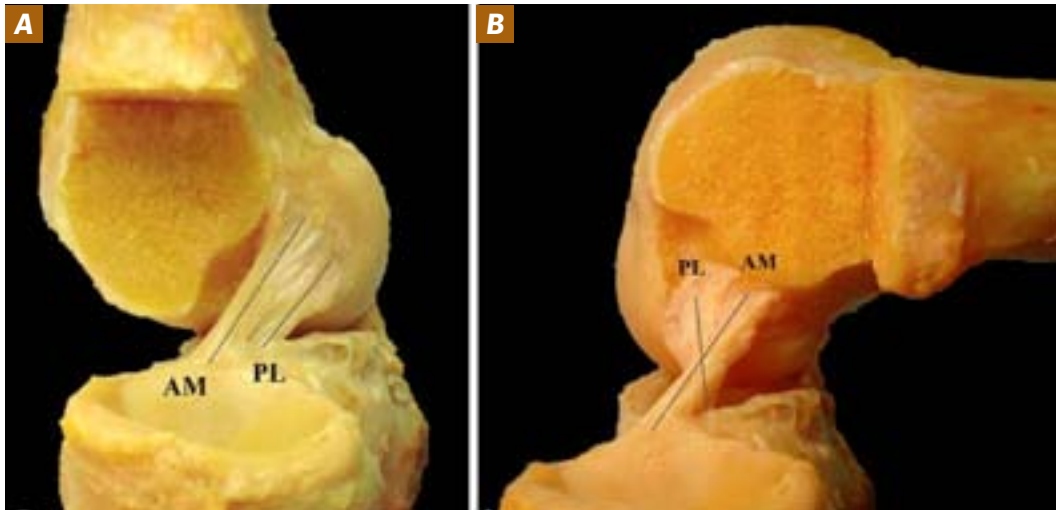
el LCA tiene una rotación externa fisiológica que se incrementa a medida que la rodilla es flexionada, y se debe a la orientación de sus inserciones óseas.

La función de estabilizador en el plano sagital es conocida desde hace muchas décadas, sin embargo la importancia de este ligamento en el control de la estabilidad rotacional de la rodilla ha sido reconocida sobre todo en las últimas dos décadas. El LCA se tensa durante el movimiento de flexo-extensión de la rodilla de manera que se limita la hiperextensión de la articulación. El LCA también actúa como un estabilizador secundario en los movimientos de varo-valgo.

### **1.1.7 HAZ ANTEROMEDIAL Y HAZ POSTEROLATERAL**

El haz AM tiene una orientación más vertical, de aproximadamente 70° a la base de la rodilla. Su inserción está en la parte más anterior de la inserción tibial y en la parte más superior de la inserción femoral. Este haz está más tenso con la rodilla flexionada a 90° que con la rodilla en extensión, coincidiendo con una mayor laxitud del haz PL. Por lo tanto en flexión, el haz AM se vuelve dominante a la hora de resistir a la translación anterior de la tibia y en extensión esta función recae en mayor medida sobre el haz PL. En cuanto a la estabilidad rotatoria, al haz PL se le atribuye una mayor importancia que al haz AM (15). La inserción del haz AM en el fémur se encuentra en una posición más alta que el haz PL, que tiene una inserción más baja y anterior.

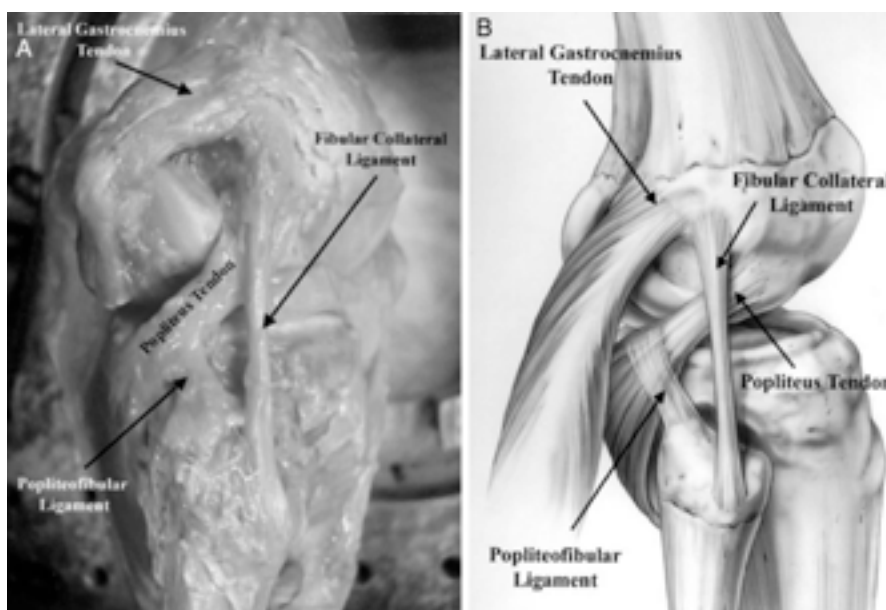
La inserción tibial es la que da nombre a cada uno de los dos haces del ligamento. Esta inserción tiene un borde anterior a unos 10-14 milímetros detrás del borde anterior de la tibia y se extiende entre la espina tibial medial y lateral. El centro de la inserción del haz AM está en íntima relación con el cuerno anterior del menisco lateral, mientras que el centro de la inserción del haz PL tiene una distancia de 7 a 8 milímetros anterior al origen del LCP (Figura 1).



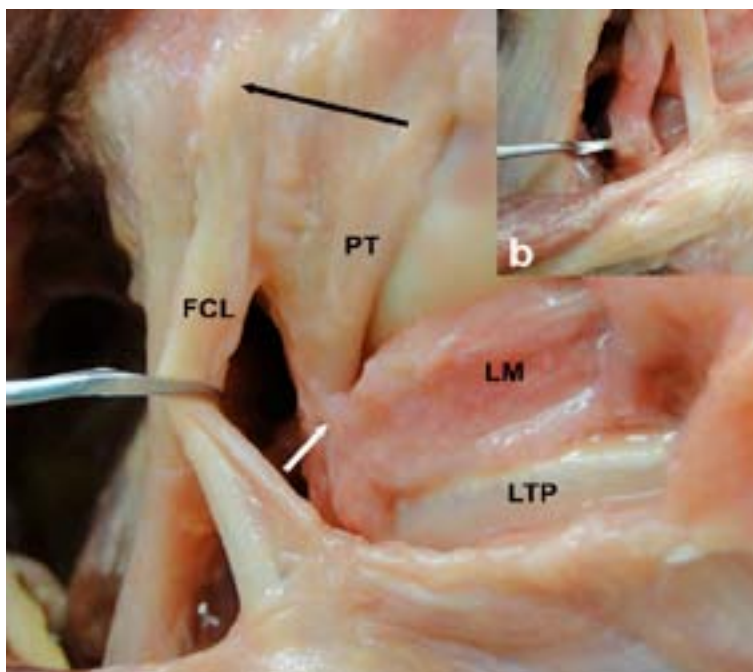
**Figura 1.** Haz PL y AM con la rodilla en extensión (a) y con la rodilla en flexión (b). Durante la extensión ambos haces están paralelos hallándose una mayor tensión en el haz PL. Durante la flexión ambos haces se entrecruzan y el haz AM se encuentra con mayor tensión. (De Sebastian Kopf y cols. Imagen reproducida con permiso de Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy Journal)

### 1.1.8 ANATOMÍA POSTEROLATERAL RODILLA

Para una mejor comprensión de los trabajos que forman parte de esta tesis, es también relevante el conocimiento preciso de la anatomía de la región posterolateral de la rodilla, que está compuesto por diversas estructuras cápsuloligamentosas (16) (Figura 2 y 3):



**Figura 2.** Visión anatómica y dibujo de las estructuras posterolaterales de la rodilla (de Robert F. Laprade y cols. Imagen reproducida con permiso de American Journal Sports Medicine)



**Figura 3.**

Preparación cadavérica de las estructuras posterolaterales de la rodilla: El ligamento colateral lateral (FCL) se observa rechazado hacia posterior. La inserción del tendón poplíteo (PT) se sitúa a unos 18,5 mm en dirección anterior e inferior respecto a la inserción femoral del FCL (flecha negra). La flecha blanca señala el fascículo poplíteomeniscal anteroinferior, **b.** El ligamento poplíteoperoneo se observa retraído lateralmente. LTP, meseta tibial lateral.

- El músculo semimembranoso tiene una amplia inserción en la parte posterior de la rodilla. Se han descrito hasta 8 inserciones distales a nivel de la tibia y del fémur. En su mayoría, este complejo se inserta fundamentalmente en el complejo postero-medial de la rodilla, pero alguna de estas inserciones forman parte de la región posterolateral de la misma.
- Tendón del músculo poplíteo. El músculo poplíteo se origina en la región posterior y proximal de la tibia. Su tendón tiene una longitud aproximada de unos 35 milímetros y se inserta en la cara lateral del cóndilo femoral lateral a una distancia media de 18,5 milímetros anterior y distal a la inserción femoral del ligamento colateral lateral.
- Ligamento poplíteoperoneo. Este ligamento se puede considerar como una extensión del músculo poplíteo. Se forma a nivel de su unión miotendinosa y su inserción distal se produce en la parte posterior de la cabeza del peroné. A este ligamento se le atribuye una gran importancia en las reconstrucciones anatómicas del complejo posterolateral de la rodilla.

- Ligamento colateral lateral. Este ligamento es el principal estabilizador lateral de la rodilla evitando la apertura en varo de la articulación. Su origen se sitúa cercana a la del tendón poplíteo (proximal y posterior), mientras que su inserción distal se sitúa en la cara lateral de la cabeza del peroné.
- Tendón del músculo bíceps femoral. El potente músculo bíceps femoral es el principal flexor de la rodilla y está formado por dos vientres o cabezas musculares que confluyen en un tendón principal con su inserción mayoritaria a nivel de la cabeza del peroné.
- Tendón del músculo gemelo lateral. Este tendón forma parte de uno de los dos vientres del músculo gemelo o gastrocnemio, el cual actúa como flexor de la rodilla y flexor plantar del tobillo. Su inserción proximal se sitúa en la parte posterior del cóndilo femoral lateral.
- Nervio Peroneo (o ciático poplíteo externo). El nacimiento de este nervio surge a partir del nervio peroneo común o ciático común, proximal a la fosa poplíteo. A partir de aquí este nervio desciende y se lateraliza estando en íntima relación con el vientre muscular del gemelo lateral. Posteriormente penetra en el septo intermuscular posterior y discurre lateral de posterior a anterior y de proximal a distal al cuello del peroné.



## 1.2 LESIÓN Y REPARACIÓN DEL LIGAMENTO CRUZADO ANTERIOR

### 1.2.1 PREVALENCIA

La reconstrucción del LCA representa la cirugía ligamentosa más frecuente. En EEUU se realizan más de 150.000 intervenciones quirúrgicas de este ligamento al año (17). En España, esta cifra es de unas 15.000 cirugías al año (7). Una mayor participación en actividades lúdicas y deportivas en la sociedad actual ha hecho que aumente el número de lesiones de este ligamento, ya que la mayoría de estas se producen en un contexto deportivo. Paralelamente, la evolución de las técnicas quirúrgicas empleadas en su reconstrucción así como la experiencia y conocimiento de los cirujanos en cuanto a la historia natural y secuelas de esta lesión cuando no es reparada, ha hecho que se incremente el número de reconstrucciones de LCA realizadas anualmente.

### 1.2.2 MECANISMO LESIONAL

La mayoría de lesiones se producen por un mecanismo indirecto (72%), mientras que en el resto se describe un traumatismo directo. El mecanismo más frecuente es con la rodilla en extensión o hiperextensión con un movimiento repentino de desaceleración previo a un cambio de dirección realizando rotación externa de la tibia con valgo de la rodilla (18).

La mayoría de lesiones de este ligamento se producen en deportistas o en personas que practican deportes ocasionalmente. Los deportes más implicados con esta lesión son aquellos que precisan de un pivotaje del fémur respecto a la tibia, como pueden ser el fútbol, el rugby, el baloncesto y el tenis entre otros.

### 1.2.3 EXPLORACIÓN FÍSICA

Las pruebas físicas descritas para identificar una inestabilidad en la rodilla causada por una rotura del LCA se dividen en dos: estáticas y dinámicas. En cuanto a las estáticas, estas valoran la estabilidad anteroposterior provista por el LCA. La prueba de *Lachman*

(también llamada *Noullis*) y la prueba del cajón anterior aplican una fuerza desde posterior hacia anterior a la tibia a 30° y 90° de flexión respectivamente (19), y son más sensibles teóricamente para evaluar una lesión del haz AM. En cuanto a las pruebas dinámicas destacamos la prueba del *pivot shift* que, desde el punto de vista teórico, centra su valoración hacia el haz PL y la estabilidad rotatoria de la rodilla. Esta se realiza con la rodilla en extensión completa, aplicando estrés en valgo a la tibia proximal junto a una rotación interna de la pierna. Se inicia la flexión de la rodilla, y el platillo tibial se desplaza anteriormente y se reduce sobre el cóndilo femoral con un resalte perceptible por el explorador. El examen físico de la rodilla debe completarse con el estudio de posibles lesiones asociadas.

#### 1.2.4 PRUEBAS DE IMAGEN Y DE ESTABILIDAD

La generalización de la resonancia magnética (RM) ha permitido confirmar las lesiones del LCA mediante una prueba de imagen que presenta una elevada precisión (97%) en el diagnóstico de estas lesiones cuando son completas y algo considerablemente menor, en el rango del 28% al 82%, cuando son incompletas (20, 21). Además, esta prueba es capaz de aportarnos información sobre la existencia de otras lesiones asociadas. Sin embargo, son la anamnesis y la exploración física las que nos tiene que hacer pensar en una lesión del LCA.

El uso del artrómetro KT-1000 (Medmetric, San Diego, CA, USA) o de las radiografías forzadas a 30°, en las que se provoca un cajón anterior, también nos dan información sobre la lesión del LCA y el grado de inestabilidad anteroposterior que causa dicha lesión. Objetivar la inestabilidad rotacional de la rodilla tras la rotura del LCA es más complejo y normalmente se describe mediante una prueba clínica subjetiva, y altamente dependiente del grado de relajación de cada paciente, como es el *Pivot Shift*. Sin embargo, en los últimos años, hay numerosos intentos de valorar esta prueba también mediante artrometría.

### 1.2.5 HISTORIA DE LA RECONSTRUCCIÓN DEL LIGAMENTO CRUZADO ANTERIOR


En 1895 se describió la primera reparación del LCA realizada en el Reino Unido por A.W. Mayo Robson. Unos años más tarde, el también británico, Ernest W. Hey Groves realizó la primera reconstrucción del mismo con plastia autóloga obtenida de la fascia lata. A partir de aquí, diversos autores fueron realizando diferentes aportaciones a la cirugía dirigida a reconstruir el LCA. En 1963, Kenneth G. Jones (22), aplicando los conocimientos obtenidos por otros autores como Ernst Gold, Arnold Wittek o Campbell, generalizó el uso del tendón rotuliano como injerto para reparar el LCA. Su técnica implicaba obtener una pastilla ósea proveniente de la rótula unida al tercio medio del tendón rotuliano dejando su inserción en la tuberosidad anterior de la tibia (TTA) intacta. En esta técnica, con el fin de evitar problemas con la longitud del injerto, el autor trasladó la ubicación del túnel femoral al intercóndilo justo posterior al cartílago articular. En Estados Unidos el uso de este procedimiento para la reparación del LCA fue conocido como la técnica de Jones. Esta técnica fue modificada posteriormente por diferentes autores describiéndose diversas variantes de la misma, como (23) usar solamente el tendón rotuliano sin pastilla ósea o no liberar la parte de la tuberosidad anterior de la tibia realizando un túnel a partir de aquí. Frankle, en 1969, fue el pionero en utilizar el tendón rotuliano como plastia libre a la hora de reparar lesiones de LCA, así como describir las lesiones condrales originadas a partir de una reparación demasiado tardía del LCA. Posteriormente, Marshall (24) unió a este tercio central del tendón rotuliano la fascia prepatelar y la porción central del cuádriceps. Otros autores como Clancy (25, 26), Noyes (27, 28), Dejour (29), Rosenberg o Gillquist (30) realizaron, a principios de los años 80, diferentes aportaciones a la reconstrucción del LCA (Figura 4).



**Figura 4.** A la izquierda vemos una preparación de un cuádruple haz formado por los tendones recto interno y semitendinoso (isquiotibiales). A la derecha una plastia de tendón rotuliano con un bloque óseo en cada extremo.

Referente a la utilización de los tendones de los músculos isquiotibiales como injerto para reconstruir el LCA, Harry B. Macey en 1939, describió por primera vez el paso de un tendón semitendinoso sin desinserción tibial a través de un túnel tibial y otro femoral. Este injerto era suturado posteriormente al periostio. Esta técnica se basaba en trabajos previos de Riccardo Galleazzi y Alexander Edwards. En 1950, K. Lindeman describió la manera de pasar un tendón del recto interno o gracilis de base proximal a través de la cápsula posterior por un túnel tibial. Robert W. Augustine modificó esta técnica en 1956 utilizando el semitendinoso como una transferencia dinámica. En 1982, A.B. Lipscomb (31) inició el uso de los tendones provenientes de la pata de ganso (semitendinoso y recto interno) pediculados en la tibia como plastia para la reconstrucción del LCA. Posterior a este trabajo, Gomes y Marczyk (32), publicaron los resultados de la utilización de una lazada doble de tendones de la pata de ganso fijados en un túnel mediante un bloque óseo. Posteriormente SM Howell (33) describió esta misma técnica pero fijando el injerto mediante un tornillo y una arandela con dientes. A finales de los años 80, Marc Friedman (34) se convirtió en el abanderado en el uso del cuádruple haz de isquiotibiales mediante artroscopia. A partir de aquí, numerosos autores han utilizado este injerto fijándolos con diferentes sistemas en tibia y fémur.

La plastia denominada hueso-tendón-hueso (HTH), proveniente del tercio medio del tendón rotuliano incluyendo dos pastillas óseas, ha sido la más usada en la historia de



esta cirugía. Sin embargo, la morbilidad que este injerto genera en la zona donante y que conduce con frecuencia a dolor residual en la cara anterior de la rodilla, ha propiciado el notable incremento en la utilización de la plastia proveniente de los tendones de los músculos isquiotibiales en los últimos años.

### **1.2.6 TIPOS INJERTOS**

Diferentes tipos de injertos se han descrito para reconstruir un LCA. Estos se dividen en autoinjertos o aloinjertos. El aloinjerto proviene de un banco de tejidos y puede ser un tendón rotuliano con una pastilla ósea tibial y otra de la rótula, un tendón de Aquiles, un tendón cuadricipital o un tendón tibial posterior entre otros.

En cuanto a los injertos autólogos, como ya hemos mencionado en el apartado anterior, el más usado en los últimos años es la plastia proveniente de tendón rotuliano con una pastilla ósea en su extremo proximal de la rótula y otra distal de la tuberosidad tibial anterior. Esta plastia aporta teóricamente una mejor integración de los extremos de la plastia a la tibia y al fémur ya que esta integración es hueso-hueso (35).


La alternativa más utilizada, la formada por los tendones de los músculos gracilis y semitendinoso, no posee pastilla ósea en sus extremos, por lo que en teoría la integración en los túneles óseos demora más tiempo en producirse. Sin embargo los resultados funcionales y histológicos obtenidos han demostrado ser similares a los obtenidos con la plastia proveniente del tendón rotuliano (36, 37). Como se ha comentado previamente, esta plastia presenta como principal ventaja, una menor morbilidad de la zona donante en comparación al HTH.

La tercera plastia autóloga más usada es la que proviene del tendón cuadricipital, ósea proveniente del polo superior de la rótula. Esta plastia no tiene la popularidad de las dos anteriores y se suele dejar como alternativa en casos de revisión o cuando las fuentes para obtener las otras dos plastias están comprometidas.

El uso de plastias provenientes de un banco de tejidos se ha convertido en los últimos años en la primera opción en muchos centros, sobre todo en Estados Unidos. Aunque no se puede descartar definitivamente la posibilidad de transmitir algún tipo de enfermedad viral, el uso de esta plastia se considera una alternativa válida sobre todo en cirugías de fracaso de una plastia de LCA.

### **1.2.7 VARIACIONES TÉCNICAS**

Como se ha comentado anteriormente, son muchos los trabajos sobre el LCA que han sido publicando en las últimas dos décadas, mejorando notablemente la técnica quirúrgica. Además, son numerosas las opciones tecnológicas que la industria ha ido ofreciendo a la hora de realizar las fijaciones de las diferentes plastias tanto a nivel femoral como tibial. Pero, sin duda alguna, el gran avance de la última década es haber retomado el concepto de la reconstrucción anatómica del LCA. Este concepto afecta sobre todo a la ubicación del túnel femoral en el cóndilo femoral lateral. Para el preciso reconocimiento quirúrgico del sitio anatómico donde realizar los túneles, es esencial para el cirujano tener un conocimiento muy exacto de la anatomía de las inserciones del LCA. El método más usado para indicar y referirse al sitio donde se realiza el túnel femoral ha sido tradicionalmente el denominado sistema de la esfera horaria, en el que un reloj imaginario se superpone al hemicírculo del techo del intercóndilo y cada hora representa una ubicación determinada. De esta manera, en una rodilla derecha, las 12 hs. se ubicaría en la parte más superior de la escotadura intercondílea, y las 9 hs. en la parte más lateral y baja del cóndilo femoral lateral (equivaldría a las 3 hs. en la rodilla izquierda). Este método está discutido pues sólo considera un plano a la hora de definir la ubicación del túnel femoral, cuando olvida el plano sagital ya que obviamente la rodilla es una estructura tridimensional (38). El túnel femoral se realiza de forma más común mediante 2 técnicas diferentes: a través del túnel tibial (previamente labrado para la realización del túnel tibial) o a través de un portal artroscópico anteromedial. La primera se denomina como técnica monotúnel (porque se hacen ambos túneles en continuado



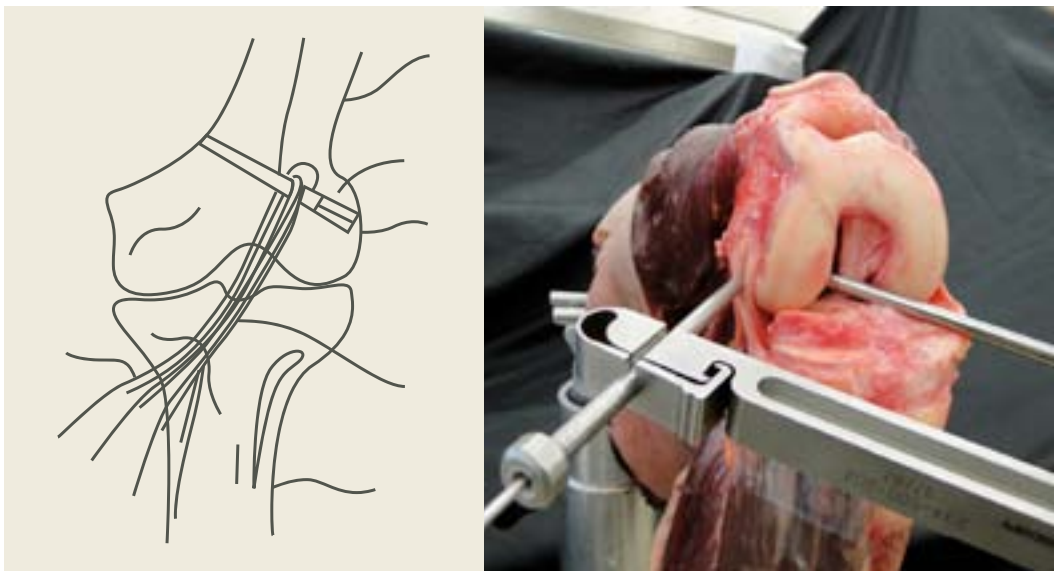
entre ambos túneles) y la segunda es una técnica bitúnel (porque el túnel tibial y el femoral se realizan de forma independiente).

Otra disyuntiva es si se realiza un único túnel femoral, y por lo tanto se reconstruye un único fascículo del LCA (monofascicular), o se realizan dos túneles (bifascicular) ateniéndonos a la constitución en dos haces del LCA. La opción bifascicular es menos usada pues no ha demostrado diferencias funcionales con el túnel único y es mucho más exigente técnicamente además que duplica los costos en material de fijación (39, 40). Cualquiera sea el caso, parece que lo importante es la realización de los túneles en el lugar anatómico donde previamente se encontraba el ligamento nativo, es decir, restituir lo más fielmente al ligamento que se encontraba en la rodilla.

En cuanto al túnel tibial, este se realiza desde la parte anteromedial de la tibia proximal con control artroscópico para controlar el punto de salida intraarticular, que debe ser a nivel de la huella o fibras remanentes de la inserción del LCA nativo. Podemos variar el grado de angulación del túnel tanto en el plano coronal como sagital, pero normalmente este túnel suele tener una angulación de unos  $55^{\circ}$  en el plano sagital y unos  $20^{\circ}$  en el plano coronal, iniciándose entre uno y dos centímetros medial a la tuberosidad tibial anterior.

Tras la realización de los túneles, y tras haber pasado la plastia, tenemos varios sistemas para fijar la plastia a la tibia y al fémur. El uso de grapas metálicas, de tornillos metálicos o de los más recientes tornillos reabsorbibles interferenciales son algunos de estos sistemas. En el caso de usar plastias proveniente de tendones isquiotibiales, para la fijación tibial podemos usar cualquiera de los sistemas mencionados (normalmente un tornillo interferencial), pero para la fijación femoral este sistema de fijación no se usa tan frecuentemente. Para ello la industria ha creado diferentes tipos de anclaje. Los dos sistemas más utilizados para realizar esta fijación femoral son los de suspensión cortical y los de fijación transversal. Los sistemas de fijación transversal ofrecen una

fijación de la plastia a nivel del fémur con un poste que entra perpendicular al túnel femoral desde la parte externa del cóndilo femoral lateral (Figura 5). Este sistema ha sido diseñado para su utilización en la técnica monotúnel, donde la ubicación del túnel femoral suele ser más alto y donde por lo tanto la introducción transversal del poste se realiza más proximal en la rodilla, lejos de las estructuras de la región posterolateral de la rodilla. Uno de estos sistemas de fijación es el *Cross Pin* (Stryker, Kalamazoo, MI), y fue el sistemas de fijación utilizado y evaluado en los 2 primeros trabajos de investigación que conforman esta tesis doctoral.




**Figura 5.** Sistema de fijación femoral *Cross Pin*. La fijación femoral entra en el cóndilo femoral lateral perpendicular al túnel femoral.

### 1.2.8 EVOLUCIÓN DE LA UBICACIÓN DEL TÚNEL FEMORAL

Como hemos comentado, el LCA tiene una importancia no sólo en el control de la traslación anterior de la tibia sino también en la estabilidad rotacional, actuando contra las fuerzas combinadas de rotación y valgo de la tibia sobre el fémur (41-43). La realización de un doble túnel a nivel femoral ha demostrado en estudios biomecánicos que otorga un mejor control rotacional de la rodilla (44). Sin embargo, este tipo de cirugía es técnicamente más demandante debido a la dificultad que entraña realizar dos túneles en el cóndilo femoral lateral, además que tampoco ha demostrado mejores resultados *in*





vivo que la realización de un túnel único en el fémur y por tanto un único fascículo (45). Si a esto sumamos el mayor coste de esa técnica, encontramos el porqué esta técnica bifascicular está cayendo cada día más en desuso, de manera que la realización de un único túnel se está convirtiendo en la regla a la hora de reconstruir el LCA.

Inicialmente, con la idea de mantener la isometría de la plastia en cualquier grado de flexión de la rodilla, se sacrificó el concepto anatómico de túnel femoral por el concepto isométrico del mismo. Por esto la ubicación de este túnel femoral se realizó históricamente en una posición alta en el intercóndilo (46, 47). Con esta ubicación del túnel, se restituye de manera efectiva la estabilidad anteroposterior de la tibia sobre el fémur, pero no es tan efectiva en restituir la estabilidad rotacional. En la última década, diferentes estudios anatómicos (48-50) han demostrado que un descenso del túnel femoral hacía una ubicación más anatómica del mismo, proporciona un mejor control de la estabilidad rotacional sin sacrificar la restitución de la estabilidad anteroposterior (42, 51, 52).

A la hora de hablar de la ubicación del túnel femoral, en los últimos años se ha comenzando a dar importancia no solo al plano coronal, sino también al plano sagital. Mientras el plano coronal se describía como se ha comentado previamente con el sistema de referencia horaria (ahora denominado *alto/bajo*), tenemos que tener en cuenta también la ubicación del túnel femoral en el plano sagital, atendiendo al concepto *superficial* (más cercano a la cortical anterior del fémur con la rodilla a 90° de flexión)/ *profundo* (si el túnel queda más cercano a la cortical posterior del fémur con la rodilla a 90° de flexión). A partir de aquí, se han descrito numerosos estudios a la hora de definir las localizaciones de los túneles femorales cuando realizamos una reconstrucción anatómica del LCA (53, 54).

La ubicación anatómica del túnel femoral requiere una ubicación más baja en el plano coronal y más superficial en el plano sagital del que históricamente se venía utilizando. La técnica transtibial o monotúnel se ha demostrado de forma reiterada como ineficaz

o al menos dificultosa para ubicar el túnel femoral en su posición anatómica de forma fiable y reproducible, sin el riesgo de lesionar el cartílago de la meseta tibial medial o de lesionar el ligamento colateral medial (55, 56). Debido a esto, se aconseja acceder al sitio anatómico del planificado túnel femoral desde un portal artroscópico antero-medial bajo (57, 58).

El problema en lo referente a esta variación técnica es que si utilizamos un sistema de fijación femoral transversal, la entrada del poste perpendicular desde la parte externa del fémur queda claramente alterada. Como ha sido comentado previamente, este sistema fue diseñado para ser utilizado en túneles femorales realizados desde el túnel transtibial y con una ubicación del túnel en la parte alta del intercóndilo (59). De esta manera, la guía transversal, que se coloca de forma percutánea a través del cóndilo femoral lateral, ha demostrado un bajo riesgo de dañar las estructuras laterales adyacentes (60). Pero el descenso de este túnel, en aras de conseguir una posición más anatómica, podría suponer como consecuencia un daño en las estructuras anatómicas de la región posterolateral de la rodilla cuando colocamos la guía perpendicular al túnel femoral (Figura 6). Con esta nueva ubicación del túnel, la guía transversal tiene una entrada más baja y cercana a las estructuras posterolaterales de la rodilla. Este hecho podría cuestionar la utilización de este sistema de fijación cuando realizamos el túnel femoral en su ubicación anatómica. A partir de esta incertidumbre se iniciaron una serie de trabajos con el objetivo de dar respuesta a los interrogantes surgidos sobre la seguridad de utilizar este instrumental inicialmente diseñado para otra variante técnica.

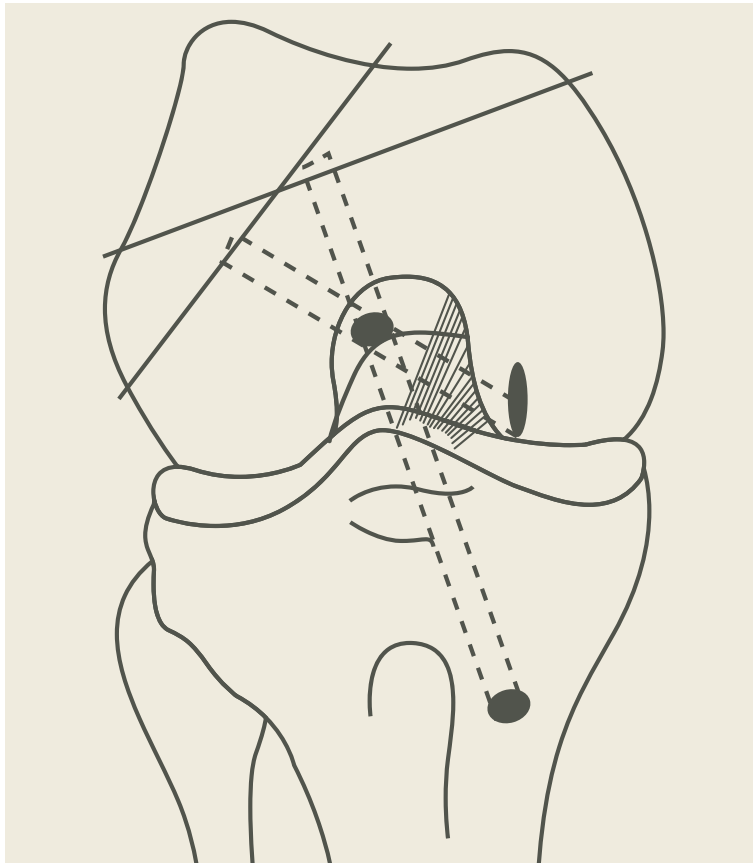


**Figura 6.**

En esta imagen se puede ver la colocación de un Cross Pin en medio de las estructuras posterolaterales de la rodilla a consecuencia de descender la entrada de este sistema de fijación transversal al buscar una ubicación más anatómica del túnel femoral del LCA.

### 1.2.9 FUNDAMENTO DE LOS TRABAJOS

El primero de los trabajos incluidos en esta tesis (*Anatomic single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction from the anteromedial portal: evaluation of transverse femoral fixation in a cadaveric model*) intenta dar respuesta a la idoneidad de un sistema de fijación femoral transversal cuando realizamos este túnel siguiendo una técnica anatómica. Para ello, es importante conocer el trabajo realizado por Pujol y cols. (61) donde se compara la realización del túnel femoral a través del portal anteromedial o del portal transtibial a diferentes grados de flexión. Estos autores concluyen que la realización del túnel desde un portal anteromedial mediante una técnica anatómica no incrementa el riesgo de lesionar las estructuras posterolaterales cuando la rodilla está hiperflexionada a 130°. Sin embargo, en este trabajo no quedan claros factores claves como el punto exacto en donde se comienza a labrar el túnel femoral en el cóndilo femoral lateral desde ambos portales. (Figura 7). Por esto, el primer artículo de esta tesis buscó conocer el peligro existente de lesionar las estructuras posterolaterales de la rodilla así como las diferentes estructuras óseas cuando utilizamos este sistema de fijación realizando el túnel femoral con la profundidad recomendada por la casa comercial, para su uso en la técnica transtibial, pero para realizar el túnel en su ubicación anatómica mediante un portal anteromedial.



**Figura 7.**

Imagen original del estudio de Pujol y cols. En esta imagen se aprecia como la entrada del túnel femoral desde el portal anteromedial y transtibial no varía. Se puede apreciar como varía la ubicación de la guía transversa dependiendo de la angulación de este túnel. (De Pujol y cols. Imagen reproducida con el permiso de Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy journal).

Con los resultados obtenidos en el primero de los trabajos y atendiendo a otros estudios publicados, como el previamente comentado de Pujol y cols. (61), se diseñó un segundo estudio (*Effect of femoral tunnel length on the safety of anterior cruciate ligament graft fixation using cross-pin technique: a cadaveric study*) con la finalidad de conocer si la variación en la longitud del túnel femoral podría variar el riesgo de lesionar las estructuras posterolaterales de la rodilla utilizando el mismo sistema de fijación.

Por último, siguiendo el concepto de ubicación anatómica del túnel femoral y la dificultad encontrada para su reproducibilidad, se diseñó un tercer trabajo (*Effectiveness of a footprint guide to establish an anatomic femoral tunnel in anterior cruciate ligament reconstruction: computed tomography evaluation in a cadaveric model*) en el que se compararon la efectividad de dos guías para situarse en la localización anatómica del punto de entrada para dicho túnel femoral. Una de estas guías era la guía en escalón (*offset*),

tradicionalmente usada desde el portal transtibial, que toma como referencia la cortical posterior del cóndilo femoral lateral. La otra guía era la guía *BullsEye* (ConMed Linvatec, Largo, FL), diseñada específicamente para la realización de un túnel en la posición anatómica desde el portal anteromedial (Figura 8).



**Figura 8.**

Imágenes artroscópicas de las dos guías de túnel femoral evaluadas:

**A)** La guía de escalón (*offset*) toma como referencia la cortical posterior del cóndilo femoral externo.

**B)** La guía *BullsEye*, en cambio, se coloca directamente sobre la impronta del LCA.

Estos tres trabajos publicados en revistas de gran impacto dentro del mundo de la medicina deportiva fueron realizados en modelos cadavéricos bajo técnicas artroscópicas y su posterior estudio por disección de las estructuras posterolaterales de la rodilla. Se estudiaron principalmente la importancia de la flexión de la rodilla, de la guía utilizada para la realización de dicho túnel y de la longitud del túnel en el correcto emplazamiento del mismo para una mayor seguridad de estas estructuras anatómicas, todos detalles técnicos de importancia capital en la reconstrucción quirúrgica del LCA.

## 1.3 HIPÓTESIS DE TRABAJO

### **Hipótesis trabajo 1**

La realización del túnel femoral siguiendo las recomendaciones indicadas por la técnica quirúrgica del *Cross-Pin* (Stryker) en lo referente a la longitud del túnel femoral del LCA, las cuales fueron descritas inicialmente para la realización del túnel desde un portal transtibial, podrían poner en peligro las estructuras posterolaterales de la rodilla.

### **Hipótesis trabajo 2**

La realización de un túnel femoral más largo de aquel recomendado por la técnica quirúrgica de *Cross-Pin* prevendría el daño de las estructuras posterolaterales de la rodilla.

### **Hipótesis trabajo 3**

La guía *BullsEye* (ConMed Linvatec), en comparación con la clásica guía de escalón femoral proporcionaría una ubicación del túnel femoral más anatómica.

Adicionalmente, la segunda hipótesis de este trabajo fue que una mayor flexión de la rodilla en el momento de la realización del túnel femoral permitiría obtener un túnel de mayor longitud.



# MATERIAL Y MÉTODOS





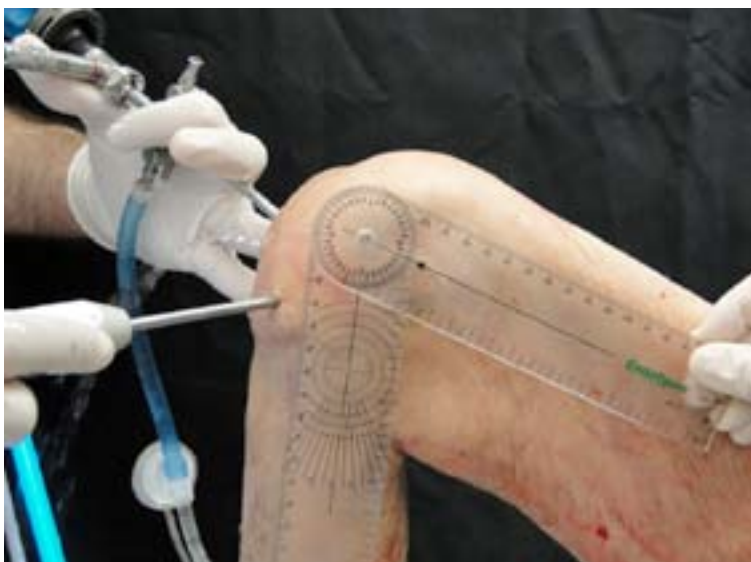
## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### Trabajo nº1

Anatomic single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction from the anteromedial portal: evaluation of transverse femoral fixation in a cadaveric model.

En este primer estudio se evaluaron inicialmente 11 rodillas frescas con su extremidad entera (6 izquierdas y 5 derechas). Una rodilla mostraba un importante estrechamiento del espacio intercondíleo durante la artroscopia por lo que fue excluida del estudio. Las restantes 10 rodillas provenían de pacientes con una media de edad de 83,5 años (rango 68-96). Estas rodillas fueron estudiadas estando montadas en un sistema específico de soporte de material cadavérico (Extremity Holder; Saw-bones, Sweden).

El primer paso fue marcar el eje longitudinal del muslo, definido como la línea que pasa a través del trocánter mayor y del epicóndilo lateral de la rodilla, mediante un rotulador y una regla de metal. Por otro lado se marcó el eje longitudinal de la pierna, definido como una línea que va desde la cabeza del peroné al maleolo peroneal. La flexión de la rodilla se calculó en todo momento mediante un goniómetro manual y utilizando estas dos líneas como referencia. (Figura 9)



**Figura 9.** Imagen de una rodilla donde se mide su angulación con un goniómetro manual.

Los tendones de los músculos gracilis y semitendinoso se obtuvieron mediante una incisión longitudinal de unos 30 mm medial a la tuberosidad anterior de la tibia. Cada tendón fue suturado en cada uno de sus extremos con hilos irreabsorbibles de forma trenzada. Al mismo tiempo se utilizó un alambre de 0.8 mm que se incluyó en el tendón con la finalidad que la plastia fuera visible en el estudio radiológico posterior. El diámetro de cada plastia, con el alambre incluido, fue medido en cada caso. (Figura 10).

El protocolo de experimentación fue el siguiente:

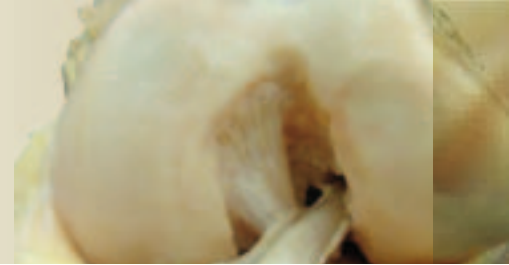
- 1º.** Reconstrucción del LCA fijando la plastia a nivel del fémur mediante el sistema *Cross-Pin*.
- 2º.** Estudio radiológico para evaluar la ubicación del túnel
- 3º.** Disección de la rodilla midiendo la distancia desde el *Cross-Pin* hasta las estructuras que conforman la anatomía de la región posterolateral de la rodilla.

### **Procedimiento artroscópico**

El procedimiento se realizó con la rodilla a 90° de flexión. Se realizó un portal anterolateral alto utilizado como portal de visualización y se estableció un segundo portal anteromedial bajo como portal de trabajo. Los referentes usados para establecer este segundo portal fueron el extremo inferior de la rótula y un punto 1 cm medial al tendón rotuliano.

El túnel tibial se realizó tomando como referencia intraarticular el centro de la huella del LCA original. Dependiendo del diámetro de la plastia, se realizó un agujero de entre 7 y 10 mm usando la instrumentación de la casa comercial (ACL System; Stryker).

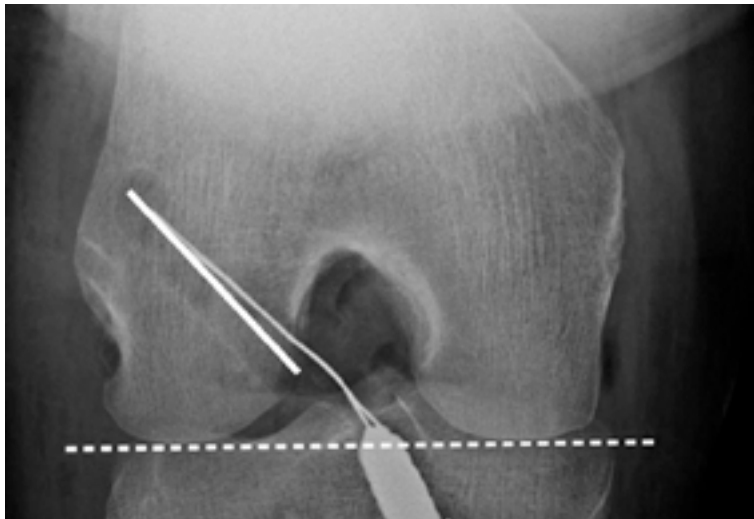
El punto de partida para la realización del túnel tibial fue siempre 2 cm medial a la tuberosidad tibial anterior y el ángulo de inclinación en el plano sagital fue de 55° en todos los casos. La desviación en el plano frontal, tomando como referencia un eje perpen-



dicular a la meseta tibial, fue de  $20^\circ$ . El túnel femoral se realizó con una flexión de rodilla de  $110^\circ$ . La guía femoral tipo escalón utilizada dependía de la medida de la plastia dejando 2 mm de margen en la pared posterior de manera que el túnel fuese colocado en su posición más anatómica (62) y evitar el compromiso de esta pared posterior. El túnel fue iniciado a nivel de las 10 en punto (rodilla derecha) y las 2 en punto (rodilla izquierda), tomando como referencia el interior del intercóndilo en una esfera horaria imaginaria. Este es conocido como el punto intermedio entre el haz anteromedial y el posterolateral en la posición alta/baja (63). Siguiendo las recomendaciones de la técnica *Cross-Pin* (Stryker), el túnel femoral fue labrado sobre un aguja guía a una profundidad de 30 mm mientras el tamaño del cóndilo lo permitiese. La guía transversal fue introducida posteriormente de forma percutánea desde la parte lateral del cóndilo femoral externo, con una inclinación ascendente de  $20^\circ$  en el plano horizontal. La plastia de isquiotibiales fue entonces introducida y fijada en su lado femoral usando un tornillo *Biosteon* (hidroxiapatita/Ácido Poli-L-láctico) *Cross-Pin* (Bcp)(Stryker) de 6x40 o 6x50 mm. La fijación tibial se realizó mediante un tornillo metálico estándar de 7 o 10x25 mm.

### **Evaluación Radiológica**

Se realizó una proyección radiológica de túnel (*Rosenberg*) a  $30^\circ$  de flexión a cada una de las rodillas. De acuerdo con un método descrito recientemente, la orientación del túnel femoral se calculó tomando como referencia la línea tangente a la parte distal de los cóndilos femorales (64). Se realizó una superposición de un reloj mediante ordenador a esta imagen radiológica de manera que las 12 en punto era el punto más alto del intercóndilo. A partir de esta imagen obtuvimos el punto de entrada de las agujas que se expresó en horas y en intervalos de cuartos de hora. (Figura 10).



**Figura 10.**  
Proyección en túnel.  
Línea sobreimpresionada  
en el extremo distal de los  
cóndilos. La plastia del LCA  
lleva incluido un alambre  
para poder ser estudiado  
mediante una radiografía.

### ***Disección y evaluación de las estructuras posterolaterales***

La disección se realizó mediante una incisión cutánea oval de unos 20x15 cm en la región lateral del cóndilo femoral lateral (Figura 11). Se extrajo la piel y el tejido subcutáneo al igual que la mitad posterior de la fascia lata. Posteriormente se procedió a localizar el *Cross-Pin* y a partir de aquí se disecó la parte lateral de la rodilla identificando las siguientes estructuras en cada una de ellas: ligamento colateral lateral (LCL), epicóndilo lateral, tendón poplíteo (PT), tendón del gemelo lateral (LGT) y nervio peroneo (PN). Después de una completa disección de las inserciones laterales de la rodilla, se midieron las diferentes distancias desde la guía hasta las superficies anterior, posterior y distal del fémur (Figura 12).

Se calculó la distancia más corta desde la aguja a las correspondientes estructuras. La medida final fue la media de 2 mediciones repetidas por 2 diferentes autores. Todas las medidas se realizaron mediante un calibrador digital electrónico (ProMax; Fred V.Fowler, Newton, MA) (rango, 0 a 150 mm; resolución 0.02 mm). Finalmente se realizó la disección de la parte anterior de la rodilla para certificar la correcta colocación de la plastia.



**Figura 11.**  
Incisión oval en la cara lateral de la rodilla sobre la que inician las mediciones.



**Figura 12.**  
Una vez disecadas las estructuras laterales de la rodilla, se miden las distancias desde el dispositivo transversal a las diferentes estructuras en estudio.

## Trabajo nº2

### Effect of femoral tunnel length on the safety of anterior cruciate ligament graft fixation using cross-pin technique: a cadaveric study.

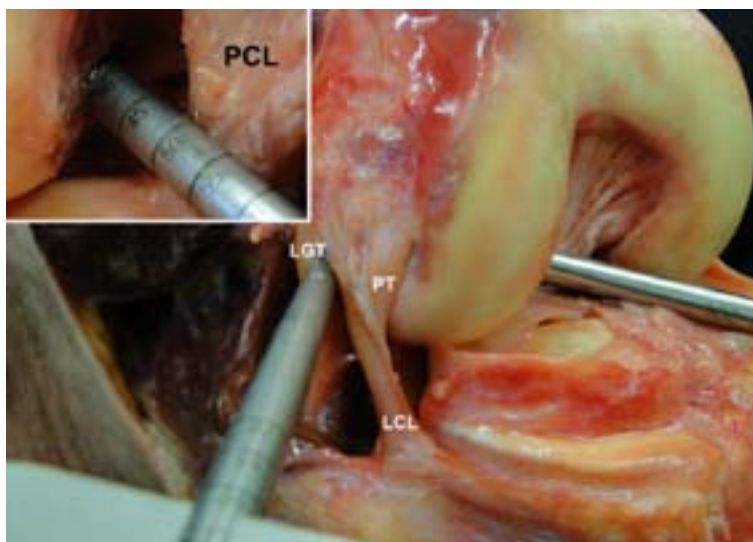
En el segundo de los estudios se realizó inicialmente un estudio piloto con 2 rodillas frescas de cadáver humano. El estudio definitivo finalmente incluyó 22 rodillas de cadáver de 14 varones y 8 mujeres cuyas edades estaban comprendidas entre 62 y 93 años (media, 76,6). Los especímenes se conservaron previamente al estudio a -18° C y fueron descongelados a temperatura ambiente durante 24-36 horas antes de ser utilizados. Como en el trabajo anterior, las rodillas fueron montadas en el mismo tipo de soporte de rodilla y se marcó el eje longitudinal del muslo y la pierna.

En este trabajo las rodillas fueron aleatorizadas en dos grupos: se realizó un túnel femoral de 30 mm en las 11 rodillas que conformaban el grupo A, mientras que para las rodillas que conformaban el grupo B, el túnel femoral fue realizado tan largo como el cóndilo femoral lateral permitía en cada caso. Vale recordar que 30 milímetros es la distancia que la técnica quirúrgica de este instrumental considera adecuado para la realización del túnel femoral (Figura 13 y 14).



**Figura 13.**

Se aprecian las guías usadas para implantar el sistema de fijación femoral. En la imagen superior izquierda se aprecia la profundidad a la que se realiza el túnel. En este caso 30 mm (grupo A).



**Figura 14.** En el grupo B, la profundidad del túnel femoral viene determinada por el tamaño del cóndilo femoral externo. En este caso el túnel medía unos 40mm. (PCL, ligamento cruzado posterior. LGT, tendón gemelo lateral. PT, tendón poplíteo. LCL, ligamento colateral lateral.

### **Procedimiento artroscópico**

El protocolo de actuación fue similar al del trabajo previo. Todas las rodillas colgaban libremente a 90° de flexión. Se realizó un portal anteromedial alto como portal de visualización y un portal anteromedial bajo como portal de trabajo. Este segundo portal más bajo se realizó tan inferior (cercano a la tibia) como fue posible con ayuda de una aguja espinal y bajo visión directa evitando lesionar el cuerno anterior del menisco medial. Además, el portal se situó tan medial como fue posible sin lesionar el cóndilo femoral medial. El inicio del túnel femoral fue marcado en el centro del muñón del LCA. Se realizó un túnel de 9 mm con una guía de broca convencional (ACL System, Stryker Corp, Mahwah, New Jersey). El túnel tibial se realizó exactamente igual que en el trabajo precedente. Posteriormente se procedió a la realización del túnel femoral. Se utilizó una guía de escalón de 7 mm para dejar 2,5 mm de pared posterior y así alcanzar la posición anatómica en el plano profundo/superficial. La posición en el plano alto/bajo se calculó siguiendo la esfera horaria. Se colocó cuidadosamente la guía en la posición de 10 en punto (rodilla derecha) y 2 en punto (rodilla izquierda) con la rodilla a 90° de flexión, marcando en estos momentos el punto de entrada del túnel – reconocido como el punto intermedio entre el haz anteromedial y posterolateral en el plano alto/bajo (63). En este momento la rodilla se flexionó hasta los 110° para brocar el túnel femoral

sobre la aguja guía. Siguiendo las recomendaciones de la casa comercial del Cross-Pin (Stryker Corp), el túnel femoral se brocó sobre la aguja guía a una profundidad de 30 mm en 11 especímenes (grupo A). En las otras 11 rodillas (grupo B), el túnel se brocó sobre la aguja guía tan profundo como el cóndilo femoral lateral permitía, deteniéndose cuando se alcanzaba la cortical posterior evitando llegar a su rotura. Posteriormente, en ambos grupos se introdujo la guía de brocado transversal en el agujero femoral ocupando toda la longitud del túnel (30 mm en el grupo A o a la máxima longitud posible en el grupo B), colocando el sistema transversal de forma percutánea en la parte lateral del cóndilo femoral de la rodilla, a 20° en sentido ascendente. El cuádruple haz de isquiotibiales se introdujo en este momento y se fijó en el extremo femoral mediante un sistema *Biosteon* de 6x50 mm (HA/PLLA) *Cross-Pin* (Stryker Corp). La fijación tibial se realizó asegurando el final de la sutura en el extremo distal de la plastia al periostio y el tejido graso que rodea la entrada del túnel tibial.

### **Evaluación radiológica**

La posición relativa del túnel femoral en el espacio intercondíleo se evaluó en primer lugar mediante una proyección radiológica lateral en cada rodilla. Las líneas posteriores de los cóndilos debían superponerse tanto como fuera posible, y se consideró 6 mm como el límite máximo de malalineación aceptable (64). El análisis de la entrada del túnel femoral se realizó tanto en las radiografías laterales mediante el método del cuadrante descrito por Bernard y cols. (65) como en proyecciones anteriores a 30° de flexión de rodilla. Como en el trabajo previo, la orientación fue medida tomando como referencia una línea tangente a la parte más distal de los cóndilos femorales. Posteriormente se superimpresionó una esfera horaria mediante un programa informático de manera que las 12 en punto era la parte más alta del espacio intercondíleo. El centro de la entrada del túnel femoral se expresó en intervalos de horas y cuartos de hora en cada rodilla. Un experimentado radiólogo no involucrado en el estudio hizo estas mediciones.





### ***Dissección y evaluación de las estructuras posterolaterales***

La disección se realizó de la misma manera que en el trabajo previo y se identificaron las mismas estructuras además del *Cross-Pin*. La zona lateral del fémur donde el *Cross-Pin* fue localizado fue clasificada dependiendo de su relación con el LCL. Aquellos casos donde el *Cross-Pin* fue colocado posterior al LCL se definió como zona de seguridad; cuando el *Cross-Pin* atravesaba el LCL o era anterior al mismo se definió como zona insegura (Figura 15). Después de reseca los tejidos blandos de la parte lateral de la rodilla exceptuando el LCL y el PT, se evaluó la distancia desde la aguja guía a las superficies posterior del fémur y del cartílago articular (CA).



**Figura 15.**

En esta imagen de la cara lateral de la rodilla se ve en diferentes tonalidades la región definida como segura (Verde) y no segura (Rojo).

A continuación se calcularon las distancias más cortas desde la aguja guía a las diferentes estructuras estudiadas mediante el mismo calibre electrónico utilizado en el estudio previo. Por último, se realizó la disección de las estructuras anteriores de la rodilla para poder certificar la correcta ubicación de la plastia.

### **Análisis estadístico**

Las variables categóricas se presentaron como porcentajes y frecuencias. Se utilizaron tanto el Test del Chi-Cuadrado de Pearson como el Test exacto de Fisher para comparar estas variables entre grupos. Para cada variable continua se calculó la media y desviación estándar así como la mediana y los cuartiles. Debido al pequeño número de la muestra y la dificultad en determinar si las variables se ajustaban a una distribución normal, se utilizó el test de Mann-Whitney para comparar las medidas en ambos grupos. Estas variables continuas se presentaron como una mediana. El análisis estadístico se realizó usando el SPSS 15 (SPSS Inc, Chicago, Illinois). La diferencia se consideró significativa al nivel de 0,05.

### Trabajo nº3

Effectiveness of a footprint guide to establish an anatomic femoral tunnel in anterior cruciate ligament reconstruction: computed tomography evaluation in a cadaveric model.

En este último trabajo se utilizaron 14 rodillas pareadas (pares del mismo donante) frescas de donantes voluntarios de extremidades inferiores completas. Había 4 donantes varones y 3 mujeres, cuyas edades variaban desde 54 a 85 años (media, 76 años). Los especímenes se conservaron, descongelaron, montaron y marcaron del mismo modo que se había realizado en los trabajos previos.

A cada una de las 2 rodillas del mismo donante se les asignó para cada uno de dos diferentes grupos: Grupo A, con un túnel realizado mediante una guía de escalón estándar de 5 mm, y Grupo B, con un túnel realizado con la ayuda de la recientemente diseñada guía *BullsEye*. El uso de rodillas pareadas se hizo para minimizar las diferencias anatómicas entre especímenes (*Figura 16*).



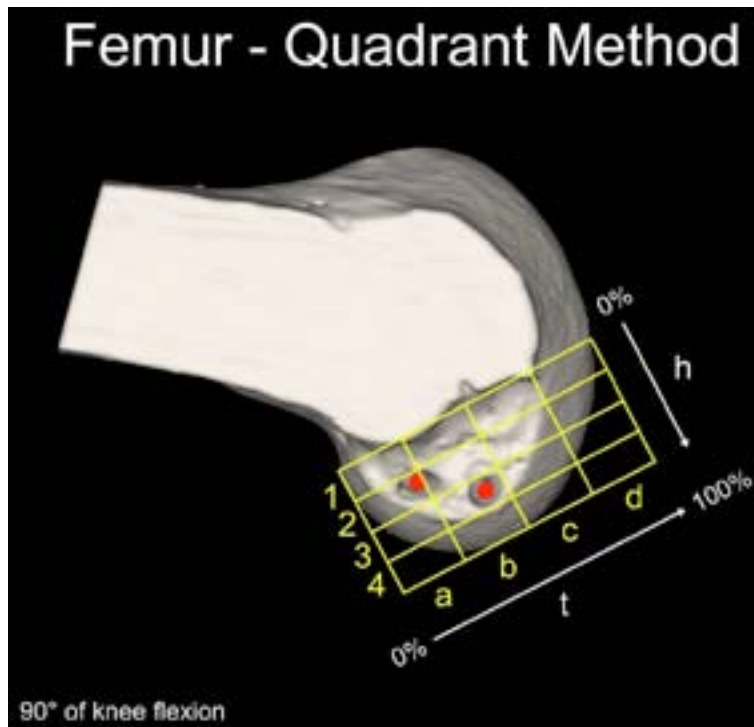
**Figura 16.** En la izquierda se observa la guía escalón que toma como referencia la cortical posterior del cóndilo femoral externo para introducir la aguja guía para la realización del túnel femoral. En la derecha se aprecia la guía *BullsEye*, que se coloca directamente sobre la huella del LCA.

### Procedimiento artroscópico

El procedimiento artroscópico se realizó de manera similar a los trabajos previos pero con algunas variaciones. Las rodillas colgaban libremente a 90° de flexión y sólo cuando había que iniciar el túnel femoral la flexión se incrementaba a 110° o 130°. Como en los otros trabajos, se realizaron 2 portales anteromediales; uno alto como portal de visualización y otro más bajo (parapatelar) que nos servía para visualizar mejor la pared medial del cóndilo femoral externo así como portal de trabajo. Como ya hemos comentado previamente, este portal se intenta situar lo más medial posible para no dañar el cóndilo femoral medial y tan distal como es posible sin dañar el cuerno anterior del menisco interno.

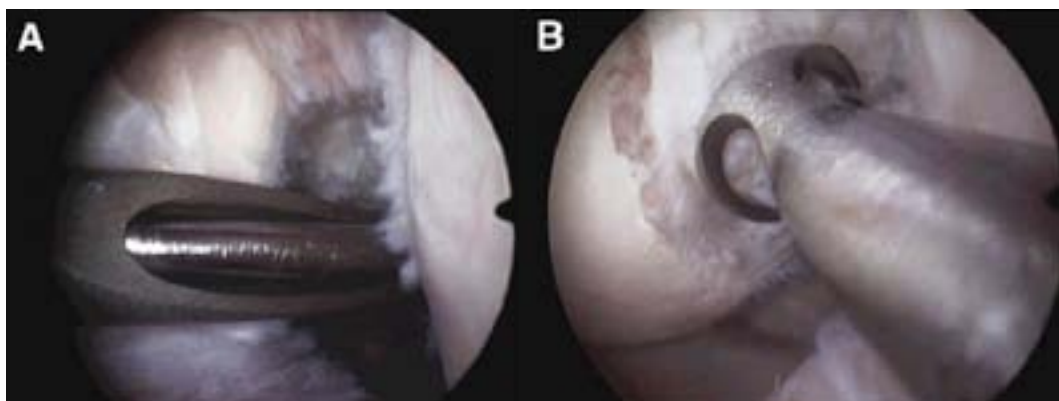
En el grupo A, la colocación del túnel femoral se realizó con la ayuda de una guía de escalón de 5 mm. La ubicación del mismo se situó a las 10 en punto en las rodillas derechas y a las 2 en punto en las rodillas izquierdas. En el grupo B, el túnel femoral se localizó con la ayuda de la guía de *BullsEye*. Su diseño abierto permite una fácil visualización de la inserción femoral original del LCA. El centro del túnel se situó en el punto intermedio entre el haz AM y el PL o en el centro de la cresta bifurcada (Figura 17), si esta se lograba apreciar claramente. En cada grupo el procedimiento fue el siguiente (Figura 18):

1. Se introdujo una aguja de Kirshner de 2.5 mm a 110° de flexión atravesando todo el espesor del cóndilo femoral lateral y sobre ella se brocó un túnel de 5 mm
2. Se colocó una aguja de Kirshner similar en el mismo punto de partida pero con la rodilla flexionada a 130° para posteriormente ampliar el túnel con una broca de 5 mm
3. Los primeros 10-15 mm del punto de entrada del túnel femoral se ampliaron con una broca de 8 mm. Este gesto se realizó para simular una situación clínica normal de la reconstrucción anatómica del LCA con un sólo fascículo al realizar la exploración con la tomografía computada en 3 dimensiones (TC-3D). Este gesto se realizó también a 130° (Figura 19).



**Figura 17.**

Imagen de perfil de la parte medial del cóndilo femoral lateral. En esta imagen se superpone una cuadrícula que define, en %, la localización exacta del túnel femoral. Esta cuadrícula toma como referencia superior la línea de *Blumensaat*. En una reconstrucción con fascículo único, buscaríamos el punto intermedio entre los dos puntos rojos que corresponderían a la localización del haz AM y el haz PL. (De Forsythe y cols. Imagen reproducida con permiso de Journal of Bone and Joint Surgery Am)



**Figura 18.** Vista artroscópica de la pared medial del cóndilo femoral lateral con la localización del túnel con una guía en escalón (A) y con una guía *BullsEye* (B).



**Figura 19.**

Vista artroscópica de un túnel femoral. Se aprecian dos túneles divergentes. El túnel más inferior (a) se realizó con la rodilla flexionada a  $110^\circ$ , mientras que el superior (b) fue realizado a  $130^\circ$ . Los primeros 15 mm del túnel se agrandaron con una broca de 8 mm (flechas).

### Estudio con TC

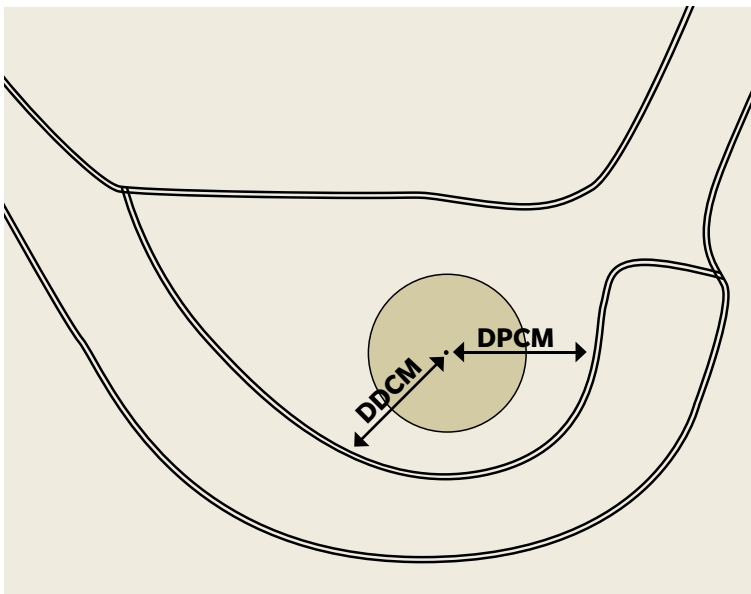
Para la realización del TC, todas las rodillas se colocaron en extensión completa obteniéndose múltiples planos de alta resolución en 3D de la ubicación de los túneles. Para ello se utilizó un aparato modelo CT Scan Toshiba Aquilon TSX-101A (Toshiba Medical Systems, Tshigi-Ken, Japan) (Figura 20). Posteriormente, y con la ayuda de un programa informático, se procesaron las imágenes, EFilm Workstation 2.1.2 (Merge Healthcare, Hartland, WI). Un radiólogo, experto en el área musculoesquelética, realizó todas las mediciones 2 veces y se obtuvo la media de estas. Los parámetros estudiados fueron los siguientes:

- La distancia mínima desde el túnel de 8 mm al margen posterior del cartílago articular. Esta distancia se denominó la distancia al margen del cartílago proximal (DPCM). Esta referencia toma como modelo los estudios de Colombet y cols. (62) y Baskedis y cols. (66).
- La distancia más corta desde el centro del túnel de 8 mm hasta el margen anteroinferior del cartílago articular (hacia abajo en el intercóndilo). Esta medida se denominó la distancia al margen del cartílago distal (DDCM) y también fue tomada de los artículos previamente citados (62, 66) (Figura 21).

- La posición del túnel se calculó con el método del cuadrante descrito por Forsythe y cols. (67). En una visión medial real del fémur con la rodilla flexionada a 90°, se superimpresionó una cuadrícula de 4x4 a las imágenes 3D del TC en la pared medial del cóndilo lateral. Siguiendo las recomendaciones de Forsythe y cols., el límite anterior del techo del intercóndilo femoral se consideró la referencia a la hora de alinear la cuadrícula (Figura 17).



**Figura 20.**  
Imagen de una de las rodillas estudiadas en el TC.



**Figura 21.**  
Parámetros morfométricos de las medidas obtenidas sobre el punto medio del túnel femoral; DPCM, distancia mínima del centro al túnel al margen posterior del cartilago articular. DDCM, distancia mínima desde el centro del túnel al margen anteroinferior del cartilago articular.

Mientras que estas tres medidas se calcularon sobre las reconstrucciones TC-3D, otras lo fueron de imágenes seleccionadas que eran co-planares con el túnel para así conseguir una medida directa desde la apertura intraarticular a la extraarticular:

- Longitud de los dos túneles en cada rodilla; tanto la longitud del túnel realizado a 110° de flexión en el grupo A o B como la longitud del túnel realizado a 130° de flexión en ambos grupos. Debido a que el cóndilo femoral lateral tiene una morfología redondeada y el túnel no se realiza de forma ortogonal, la longitud de la medida puede variar dependiendo de si el borde anterior o posterior del túnel se usa como referencia. Por esto la longitud del túnel se midió en el centro del túnel. Los túneles más cortos de 25 mm, la mínima medida recomendada para un túnel, fueron destacados. (68-70).
- Ángulo de divergencia (TDA) entre el túnel realizado a 110° de flexión y el realizado a 130° de flexión.
- Distancia mínima entre ambos túneles en el punto de salida en la cortical lateral del cóndilo femoral lateral mediante imágenes coplanares.
- Se reportó el compromiso de la pared posterior como cualquier discontinuidad en la cortical posterior del túnel evidenciada en cualquier corte de TC.

### **Análisis estadístico**

Las variables categóricas se presentaron como porcentajes y frecuencias. Para cada variable continua, se calculó la media y desviación estándar así como la mediana y los cuartiles. Debido al bajo número de la muestra y la dificultad para determinar si las variables estaban o no ajustadas a una distribución normal, se utilizó el test no paramétrico de Wilcoxon para comparar las medidas en ambos grupos. Las variables continuas se presentaron como medianas. El análisis estadístico se realizó con el software SPSS v 12 (SPSS, Chicago, IL). Se estableció 0,05 como el límite de la significación estadística.



A close-up photograph of a person's face, focusing on the cheek and jaw area. A large, dark, irregularly shaped lesion is visible on the skin, extending from the cheek down towards the jawline. The lesion has a mottled appearance with varying shades of brown and black. The surrounding skin is light-colored. The word "RESULTADOS" is overlaid in the upper center of the image.

# RESULTADOS



## 3. RESULTADOS

### Trabajo nº1

Anatomic single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction from the anteromedial portal: evaluation of transverse femoral fixation in a cadaveric model.

En 8 casos se obtuvo un túnel femoral de una profundidad de 30 mm. En los otros 2 casos la longitud del túnel femoral fue de 25 y 23 mm debido al pequeño tamaño de los cóndilos. En estos casos se perforó la cortical posterolateral del fémur. En el último de estos 2 casos (caso 8), se observó un moderado estrechamiento del espacio intercondíleo aunque no se realizó una intercondiloplastia ya que la impresión fue que este moderado estrechamiento intercondíleo no influenciaría en la ubicación del túnel (Tabla 1).

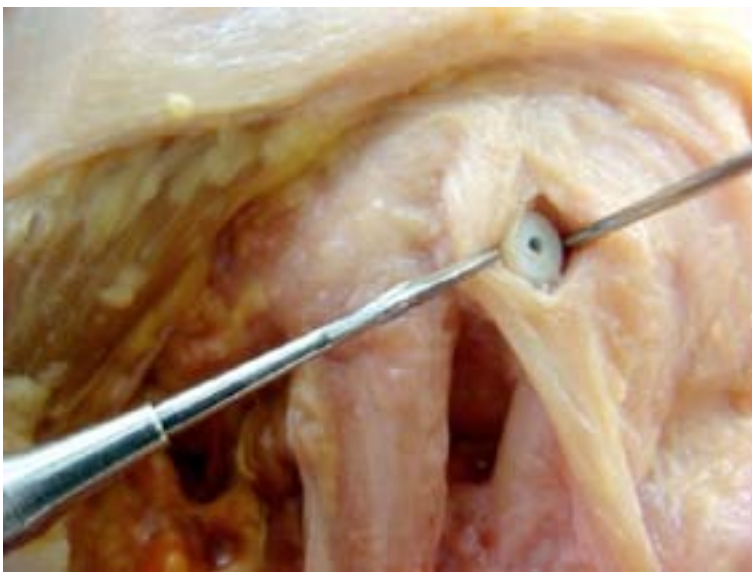
### **Evaluación radiológica**

El ángulo medio de la orientación del túnel femoral con respecto a la referencia de la línea biepicondílea fue de  $52,1^\circ$  (rango  $40^\circ$  a  $60^\circ$ ). Si tomamos como referencia la esfera horaria, la posición media del túnel era a las 10 en punto (rango 9:15, 10:30) (Figura 10).

### **LCL y Epicóndilo Lateral**

La posición del dispositivo transversal con respecto al LCL variaba de un espécimen a otro. En 8 casos este dispositivo estaba situado posterior al LCL (rango, 0 a 7,96 mm, media 2,38 mm). En una rodilla el LCL estaba parcialmente lesionado por el *Cross-Pin* (caso 9) (Figura 22). De todas formas, esta lesión parcial no se tradujo en una inestabilidad en varo cuando se valoró manualmente. En el otro espécimen, el *Cross-Pin* estaba introducido en el fémur inmediatamente anterior al LCL (caso 8). En este espécimen, la longitud del túnel femoral era tan solo de 23 mm. Esta desviación anterior en la ubi-

cación del túnel podría ser explicado en parte por el estrechamiento del espacio intercondíleo, que podría haber alterado el posicionamiento de la guía para el túnel femoral. En 8 casos la distancia del LCL al *Cross-Pin* era menor a 3 mm (rango, 0 a 2,43 mm). La distancia de la aguja al epicóndilo lateral promedió 13,96 mm (rango, 6,41 a 19,04).



**Figura 22.**

Imagen del caso donde el dispositivo de fijación transversal atraviesa la inserción proximal del ligamento colateral lateral.

### **Tendón del Músculo Poplíteo**

De forma parecida, el *Cross Pin* estaba separado del tendón poplíteo por un máximo de 1,47 mm en 3 especímenes, mientras que estaba a más de 4,5 mm en tan solo 3 casos.

### **Tendón del músculo del gemelo lateral**

En 2 especímenes el tendón del gemelo lateral estaba atravesado por el *Cross Pin* (Figura 23), mientras que estaba situado en íntimo contacto con el borde anterior del tendón en otros 4 casos.



**Figura 23.** Imagen donde se aprecia como el dispositivo transversal atraviesa el tendón del gemelo lateral.

### **Nervio Peroneo**

La distancia mínima desde el *Cross Pin* al nervio peroneo fue de 23,89 mm (media, 38,48mm).

### **Corticales Femorales**

La distancia media a la cortical anterior del fémur fue de 27,2mm (rango, 17,45 a 35,4 mm). La parte más distal del fémur distaba de media al *Cross Pin* 8,17 mm (rango, 4,08 a 15,8 mm). En un caso, el *Cross Pin* se dirigió directo a la cortical posterior, con su mitad posterior situada en la fosa poplítea. En 7 casos el *Cross-Pin* estaba a 1,52 mm de esta superficie posterior (media, 1,35 mm). En los 2 casos restantes, donde el *Cross Pin* estaba situado anteriormente (caso 8) o en el medio del LCL (caso 9), la distancia a la cortical posterior era de 14,06 y 9,5 mm respectivamente.

Bajo evaluación directa del túnel femoral, se confirmó una distancia mínima de 2 mm del *Cross Pin* a la pared posterior en todas las rodillas.

**TABLA 1.** Distancias desde el Cross-Pin de las estructuras correspondientes

| Case nº | TL (mm) | LCL (mm) | LE (mm) | PT (mm) | LGT (mm) | PN (mm) | AC (mm) | PC (mm) | DC (mm) | TO (mm) | CFP   |
|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 1       | 30      | 8        | 18,9    | 7       | 0        | 32,9    | 31,5    | 1,8     | 4,1     | 50      | 10    |
| 2       | 30      | 2,4      | 12,9    | 12,6    | 0        | 32,3    | 27,1    | 0,7     | 6,3     | 56      | 10,15 |
| 3       | 25      | 0,9      | 10,9    | 4,5     | 5,2      | 51,9    | 33,7    | 0,9     | 9,2     | 47      | 9,45  |
| 4       | 30      | 2        | 15      | 4,4     | 4,3      | 30,6    | 35,4    | 1,3     | 6,6     | 60      | 10,30 |
| 5       | 30      | 0        | 13,6    | 3,9     | 0        | 37,5    | 24,5    | 1,8     | 8,9     | 53      | 10    |
| 6       | 30      | 0        | 12,4    | 3,3     | 0        | 39,1    | 24,8    | 1,5     | 15,8    | 50      | 10    |
| 7       | 30      | 5,7      | 19      | 9,5     | 0        | 46,4    | 30      | 0       | 7,2     | 57      | 10,15 |
| 8       | 23      | 0,4      | 17,2    | 0       | 11,9     | 39,5    | 21,5    | 14,1    | 6,4     | 44      | 9,15  |
| 9       | 30      | 0        | 6,4     | 0       | 3        | 50,8    | 17,4    | 9,5     | 9,1     | 55      | 10    |
| 10      | 30      | 0        | 12,3    | 1,5     | 0        | 23,9    | 26      | 1,5     | 8,3     | 49      | 10    |

Abreviaciones; TL, longitud del túnel; LCL, ligamento colateral lateral; LE, epicóndilo lateral; PT, tendón poplíteo; LGT, ligamento gastrocnemio lateral; PN, nervio peroneo; AC, cortical anterior; PC, cortical posterior; DC, cortical distal; TO, orientación del túnel con referencia a la línea tangente a la parte distal de los cóndilos femorales; CFP, posición con respecto a la esfera horaria.



## Trabajo n°2

### Effect of femoral tunnel length on the safety of anterior cruciate ligament graft fixation using cross-pin technique: a cadaveric study.

En 10 de los 11 casos del grupo A (90.1%), se consiguió una longitud del túnel femoral de 30 mm. En el otro espécimen, sólo se consiguió un túnel de 27 mm de longitud debido al pequeño tamaño del cóndilo femoral lateral. En este caso, se perforó la cortical posterolateral del fémur. En las 11 rodillas del grupo B, la longitud del túnel femoral varió de 28 a 45 mm (mediana, 38 mm).

### **Posición túnel femoral**

La evaluación radiográfica reveló la ubicación anatómica del túnel femoral en cada rodilla de ambos grupos. El análisis de las radiografías laterales con el método del cuadrante mostraba que la posición profundo/superficial era de 25,7% para el grupo A y 34,6% para el grupo B. Con respecto a la posición alto/bajo, esta posición era de 35,3% para el grupo A y 34.6% para el grupo B (valores representados por la mediana para cada grupo)(profundo/superficial;  $p=0,519$ , alto/bajo  $p=0,797$ ) (Figura 24).



**Figura 24.**

Proyección radiológica lateral en uno de los especímenes utilizados. De acuerdo con el método del cuadrante, el túnel femoral se realizó según el plano profundo/superficial (flecha blanca) y el plano alto/bajo (flecha negra) a 25,6% y 32,7%, respectivamente.

Al analizar la orientación del ángulo del túnel respecto a la referencia biepicóndílea en una proyección radiológica posteroanterior en túnel, se obtuvo un valor de la mediana de  $53^\circ$  para el grupo A y  $51^\circ$  para el grupo B ( $p=0.3$ ). Si analizamos la posición del túnel con la referencia de la esfera horaria, la mediana es de 10 en punto para ambos grupos ( $p=0,898$ ).

### **LCL y Epicóndilo Lateral**

La posición del *Cross Pin* respecto al LCL varió de un espécimen a otro. El principal hallazgo del trabajo estaba relacionado con los resultados en la clasificación del cuadrante. El *Cross Pin* fue introducido en la zona insegura en 5 casos en el grupo A (45% de los casos). En todas las rodillas del grupo B, el *Cross Pin* se introdujo en la zona segura ( $p=0,035$ ). En 3 rodillas del grupo A donde el *Cross Pin* estaba en la zona no segura, este había entrado en el fémur entre el LCL y el PT (Figura 25). En las restantes 2 rodillas con el dispositivo transversal en la zona no segura, el LCL estaba parcialmente lesionado por el *Cross Pin*. Estas rodillas donde se lesionó el LCL, al ser testadas manualmente, no presentaban inestabilidad en varo. La distancia media dicho dispositivo al LCL era de 1,08 mm en el grupo A y de 5,57 en el grupo B ( $p=0,002$ ). La distancia media del *Cross Pin* al epicóndilo lateral era similar en ambos grupos (13,96 mm vs 13,62 mm,  $p=0,519$ ).



**Figura 25.**  
Vista lateral de la rodilla del grupo B. El *Cross Pin* fue insertado en la llamada zona segura, cercana al origen del tendón del músculo gemelo lateral.





### **Tendón del Músculo Poplíteo**

Como se deduce de los resultados de la zona de seguridad, el *Cross Pin* estaba considerablemente más cercano al PT en el grupo A (mediana 1,47 mm) que en el grupo B (mediana, 11,17 mm;  $p < 0.001$ ).

### **Tendón del Músculo Gemelo Lateral**

Por el contrario, el *Cross Pin* estaba más cercano al LGT en el grupo B (mediana, 0,31 mm) que en el grupo A (mediana, 5,2 mm,  $p = 0,028$ ). En 2 especímenes del grupo A y en 3 del grupo B, el *Cross Pin* perforaba el LGT (Figura 26) (en todos los casos alrededor del origen del tendón). En la mayoría de las rodillas del grupo B, la aguja penetraba en el fémur justo anterior al LGT.



**Figura 26.**

Vista lateral de la rodilla donde se aprecia como el dispositivo transversal penetra en el cóndilo femoral lateral atravesando el tendón del músculo gemelo lateral.

### **Nervio Peroneo**

La distancia mínima del *Cross Pin* al nervio peroneo fue de 23,89 mm. El dispositivo transversal estaba a una considerable distancia en el grupo A (media, 37,52 mm) así como en el grupo B (41,19 mm;  $p = 0,27$ ).

### Cartílago articular y cortical posterior femoral

El cartílago articular estaba más cerca del *Cross Pin* en el grupo A. Esta distancia en este grupo tenía una mediana de 7,17 mm, mientras que este valor en el grupo B era de 17,18 mm ( $p < 0.001$ ). La distancia mínima a la cortical anterior se observó en un caso del grupo A, donde el *Cross Pin* estaba a una distancia de 3,57 mm. Como se puede deducir de las relaciones con otras estructuras, el *Cross Pin* estaba más cercano a la superficie posterior del fémur en el grupo B (media, 1,52 mm) que en el grupo A (media, 4,65 mm  $\pm$  4,9 mm,  $p = 0,043$ ). En la Tabla 2 se exponen todas estas mediciones entre los 2 grupos. Bajo evaluación directa del túnel femoral, se comprobó una ubicación anatómica de la plastia en todas las rodillas.

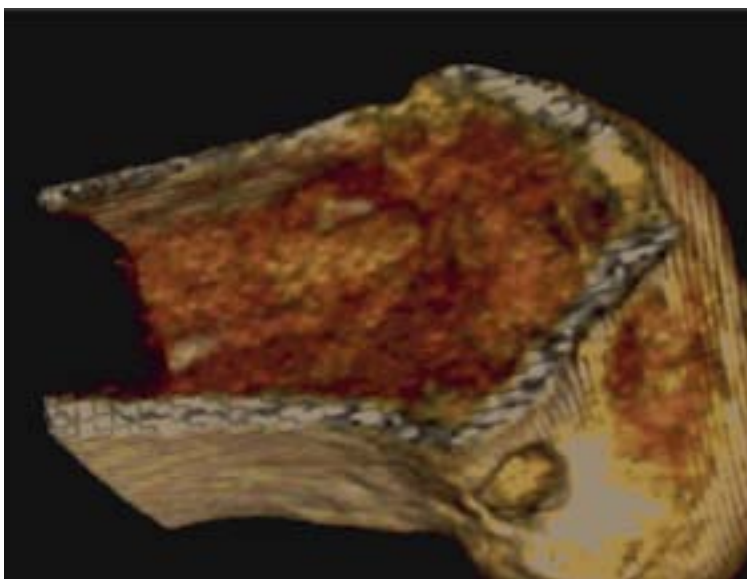
**TABLA 2.** Distancias desde el *Cross Pin* a las estructuras anatómicas expresadas en milímetros

|                                    | Media | SD  | Min  | Max  | P25  | P50  | P75  | p      |
|------------------------------------|-------|-----|------|------|------|------|------|--------|
| <b>Ligamento Colateral Lateral</b> |       |     |      |      |      |      |      |        |
| Grupo A                            | 1,5   | 2,7 | 0,0  | 8,0  | 0,0  | 1,1  | 2,0  | 0,002  |
| Grupo B                            | 5,5   | 2,9 | 1,5  | 9,6  | 2,9  | 5,8  | 8,2  |        |
| <b>Tendón Poplíteo</b>             |       |     |      |      |      |      |      |        |
| Grupo A                            | 2,8   | 3,3 | 0,0  | 9,5  | 0,0  | 1,5  | 4,5  | <0,001 |
| Grupo B                            | 11,8  | 2,9 | 7,9  | 17,5 | 8,9  | 11,2 | 14,1 |        |
| <b>Tendón Gastrocnemio Lateral</b> |       |     |      |      |      |      |      |        |
| Grupo A                            | 5,4   | 5,4 | 0,0  | 15,9 | 0,0  | 5,2  | 8,3  | 0,028  |
| Grupo B                            | 0,47  | 1,4 | 0,0  | 4,9  | 0,0  | 0,3  | 0,7  |        |
| <b>Nervio Peroneo</b>              |       |     |      |      |      |      |      |        |
| Grupo A                            | 38,5  | 8,7 | 23,9 | 51,8 | 31,4 | 37,5 | 46,4 | 0,27   |
| Grupo B                            | 42,1  | 7,2 | 32,9 | 52,9 | 34,7 | 41,2 | 51,2 |        |
| <b>Cartílago Articular</b>         |       |     |      |      |      |      |      |        |
| Grupo A                            | 7,1   | 1,9 | 3,6  | 9,2  | 6,3  | 7,2  | 8,8  | <0,001 |
| Grupo B                            | 16,9  | 3,9 | 9,3  | 22,8 | 14,9 | 17,2 | 19,2 |        |

### Trabajo nº3

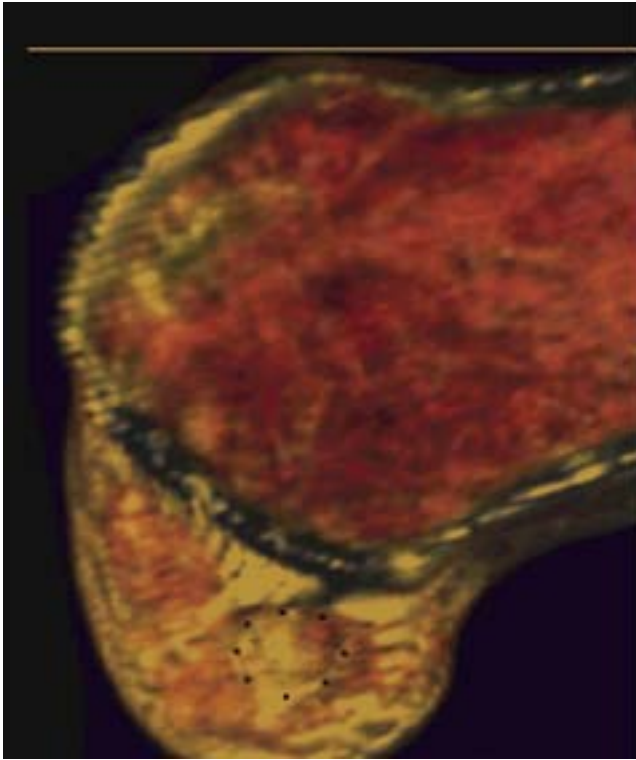
Effectiveness of a footprint guide to establish an anatomic femoral tunnel in anterior cruciate ligament reconstruction: computed tomography evaluation in a cadaveric model.

En el grupo B (guía *BullsEye*) el túnel femoral estaba en el punto medio de la pared medial del cóndilo lateral en el plano sagital (posición profundo/superficial). Por otro lado, los túneles femorales realizados en los especímenes del grupo A (guía *escalón*) estaban situados más profundos y cercanos a la cortical posterior (Figura 27 y 28). En el grupo B el valor de la mediana del DPCM fue de 9,4 mm y la mediana del DDCM fue de 8,6 mm. En el grupo A, estos valores fueron de 5,4 mm para el DPCM y 12,6 mm para el DDCM ( $p=0,018$  para ambas mediciones). Estos resultados se pueden observar resumidos en la Tabla 3. De forma similar, cuando la posición profundo/superficial era analizada con el método del cuadrante en imágenes de TC en 3D,, el túnel era más profundo en el grupo A (19,7%) que en el grupo B (26,9%) ( $p=0,018$ ).



**Figura 27.**

Imagen de TC 3D. Túnel realizado con la guía *escalón* de 5 mm (Grupo A) donde se observa un túnel más posterior o profundo en el intercóndilo.



**Figura 28.**

Imagen de TC-3D de túnel realizado con la ayuda de la guía *BullsEye* (Grupo B), donde se puede observar como el túnel se sitúa en el centro de la impronta nativa del LCA. Los puntos negros fueron sobreimpresionados para una mejor visualización del túnel.

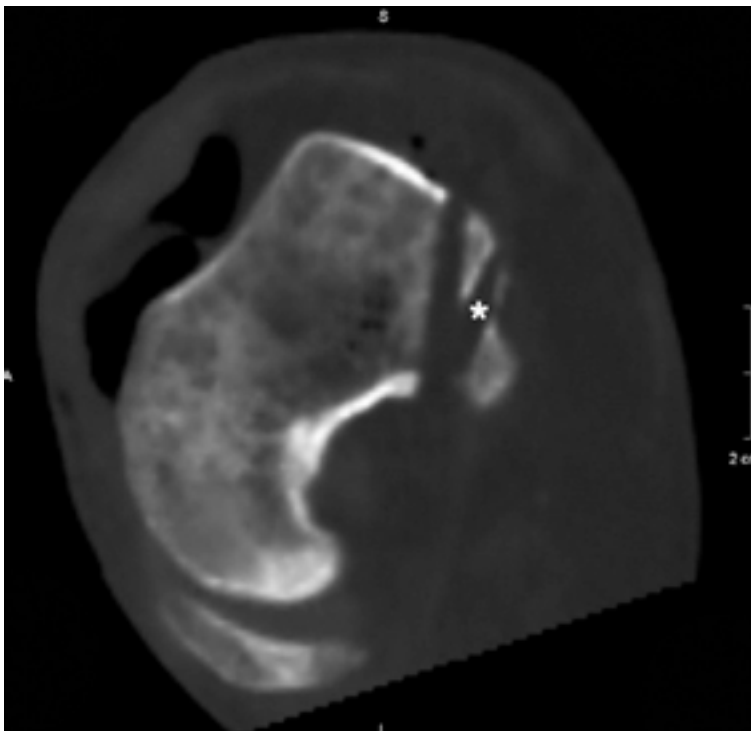
El análisis del plano coronal mostraba que los túneles del grupo A tenían un valor de la mediana para la posición alto/bajo del 30,3%. En el grupo B, estos túneles estaban situados inferiores, con un valor de la mediana de 40,8% ( $p=0,018$ ).

La longitud del túnel no mostró diferencias al comparar ambos grupos cuando el túnel se realizaba a  $110^\circ$  ( $p=0,18$ ) o a  $130^\circ$  ( $p=0,24$ ) de flexión de la rodilla. Tampoco había diferencias significativas al comparar las longitudes del túnel dependiendo del grado de flexión dentro de cada grupo (grupo A,  $p=0,091$ ; grupo B,  $p=0,15$ ). Sin embargo, 3 de los túneles realizados a  $110^\circ$  de flexión de la rodilla con la guía de escalón (grupo A) eran más cortos de 25 mm (17, 20 y 23,1 mm) (Figura 29). En la Tabla 4 se sintetizan todas las mediciones de las longitudes de los túneles.

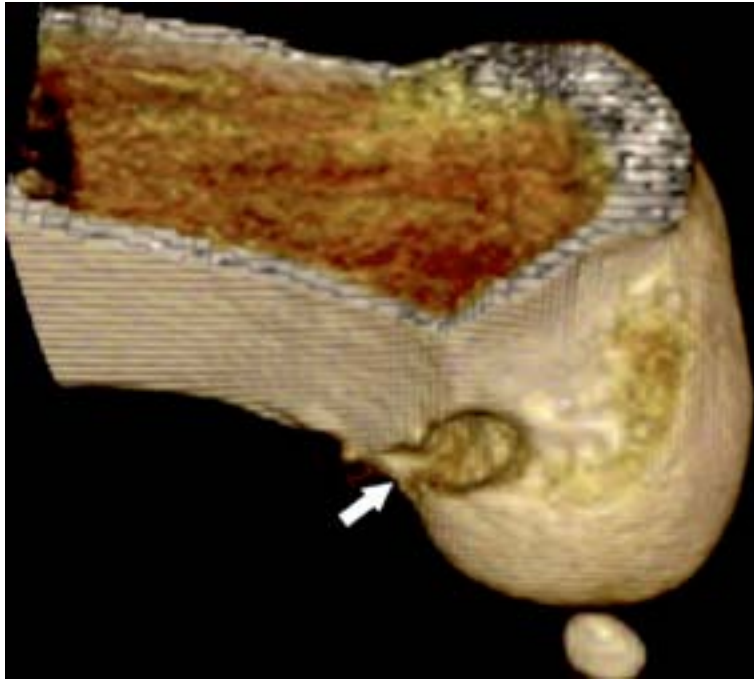
Los túneles realizados a  $110^\circ$  y  $130^\circ$  de flexión divergían uno del otro en la misma proporción a los mismos grados. El valor TDA era de  $15,6^\circ$  en el grupo A y de  $17,9^\circ$  en el

grupo B ( $p=0,18$ ). De forma similar, la distancia del punto lateral de salida de los túneles realizados a  $110^\circ$  de flexión comparado con los realizados a  $130^\circ$  de flexión fueron equivalentes cuando se compararon un grupo con el otro. El valor de la mediana para la TDA fue de 15,6 mm en el grupo A y de 17,9 mm en el grupo B ( $p=0,73$ ).

Por último, los túneles realizados a  $110^\circ$  de flexión produjeron un compromiso parcial de la pared posterior en 3 de las 7 rodillas en el grupo A (Figura 30). Estas roturas parciales de la pared posterior fueron las responsables de la menor longitud del túnel observada.



**Figura 29.** Imagen de TC, co-planar con ambos túneles. El túnel posterior (\*), realizado con la guía escalón a  $110^\circ$  de flexión, media 23 mm de longitud.



**Figura 30.** Imagen 3D del TC, mostrando el compromiso de la pared posterior del cóndilo femoral lateral (Flecha).

**TABLA 3.** Distancia desde el centro del túnel femoral a los márgenes del cartílago en el cóndilo femoral lateral realizados con la guía de escalón (Grupo A) y la guía BullsEye (Grupo B).

|             | Mínimo (mm) | Máximo (mm) | Mediana (mm) |
|-------------|-------------|-------------|--------------|
| <b>DPCM</b> |             |             |              |
| Grupo A     | 4,7         | 6,7         | 5,4          |
| Grupo B     | 8,5         | 14          | 9,4          |
| <b>DDCM</b> |             |             |              |
| Grupo A     | 10,1        | 16,1        | 12,6         |
| Grupo B     | 7,2         | 10,9        | 8,6          |

Abreviaciones; DPCM, distancia al margen del cartílago proximal (profundo); DDCM, distancia al margen del cartílago distal (bajo).

**TABLA 4.** Longitud de los túneles realizados con la guía de escalón (Grupo A) y la guía *BullsEye* (Grupo B) a 110° y 130° de flexión.

|               | Mínimo (mm) | Máximo (mm) | Mediana (mm) |
|---------------|-------------|-------------|--------------|
| <b>TL110°</b> |             |             |              |
| Grupo A       | 17          | 42          | 30           |
| Grupo B       | 27          | 40          | 34,7         |
| <b>TL130°</b> |             |             |              |
| Grupo A       | 30          | 37,2        | 35,5         |
| Grupo B       | 26          | 42          | 32           |

Abreviaciones; TL110°, longitud del túnel realizado a 110° de flexión; TL130°, longitud del túnel realizado a 130° de flexión.







# DISCUSIÓN



## 4. DISCUSIÓN

### **Trabajo nº1 y nº2**

Anatomic single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction from the antero-medial portal: evaluation of transverse femoral fixation in a cadaveric model


Effect of femoral tunnel length on the safety of anterior cruciate ligament graft fixation using cross-pin technique: a cadaveric study

El principal hallazgo del primero de los trabajos fue que la utilización de un sistema de fijación transversal, al realizar el túnel femoral de una reconstrucción anatómica del LCA, puede causar lesiones en las estructuras posterolaterales de la rodilla. El ligamento colateral lateral es la principal estructura que puede ser lesionada. En el segundo de los trabajos se observó que, si aumentamos la longitud del túnel femoral más allá de los 30 mm recomendados por la técnica quirúrgica, el riesgo de lesionar este ligamento disminuye.

Hantes y cols. (71) publicaron un trabajo donde se realizaron más de 30 reconstrucciones de LCA desde un portal anteromedial utilizando un sistema de fijación transversal (Bio-TransFix, Arthrex, Naples, FL) similar al utilizado en estos 2 trabajos. En ese estudio, los autores concluyeron que este sistema de fijación es seguro utilizado desde un portal anteromedial y realizando el túnel femoral en una ubicación anatómica. Sin embargo realizaron esta conclusión sin analizar la ubicación del dispositivo transversal con respecto a las estructuras posterolaterales de la rodilla. En este estudio tampoco se especificó el grado de flexión de la rodilla ni la longitud del túnel femoral. El resultado del primero de los estudios incluidos en esta tesis entran en contradicción con los resultados de Hantes y cols. Si realizamos la reconstrucción del LCA con un túnel femoral anatómico, según las recomendaciones de la casa comercial, el LCL y el PT son estructuras que pueden ser lesionadas fácilmente. Sólo el aumento en la longitud del túnel disminuye este riesgo, como fue posible observar en la segunda de las investigaciones. Otro de los estudios a comentar es el publicado por Pujol y cols. (61) quienes,

realizando un estudio similar a los expuestos en esta tesis, concluyeron que la utilización de este dispositivo de fijación femoral desde un portal anteromedial y con una flexión de la rodilla de 130°, no pone en peligro las estructuras posterolaterales de la rodilla. En este trabajo se compara este portal anteromedial con el clásico portal transtibial pero, según se muestra en una ilustración del trabajo, el punto de inicio del túnel desde ambos portales, es exactamente el mismo (Figura 7). Además, la realización de un túnel femoral en su ubicación anatómica es difícil de realizar de forma sistemática en todas las rodillas desde un portal transtibial (55, 56). En nuestros 3 trabajos se especificó de forma precisa la ubicación exacta del túnel femoral. Todos estos túneles se realizaron desde un portal anteromedial bajo y fue posible constatar fuera de protocolo la dificultad de realizarlo desde un portal transtibial. Por lo tanto, especulamos que Pujol y cols. ubicaron los túneles femorales mucho más alto de lo que nosotros entendemos como ubicación anatómica. Esta puede ser una razón por la cual afirmaron que las estructuras posterolaterales no se vieron afectadas.

La comprobación de la correcta ubicación del túnel en los 2 primeros trabajos se realizó bajo visualización directa en la disección final y en la proyección radiológica en túnel a 30° de flexión. En el segundo de los trabajos se añadió una proyección radiológica lateral para un mejor estudio en el plano profundo/superficial del túnel femoral. La referencia de la esfera horaria ha sido recientemente criticada por ser demasiado simple e inexacta como método para referenciar la ubicación del túnel (72) ya que no incluye en su descripción el plano sagital (profundo/superficial). Sin embargo creemos que esta referencia todavía puede tener su rol a la hora de describir la ubicación del túnel cuando realizamos una reconstrucción con un único fascículo con la guía de escalón teniendo como referencia la cortical posterior, ya que esta guía presenta una relación profundo/superficial fija. En el segundo de los trabajos con la valoración de la radiología lateral de la rodilla, también se definió la ubicación del túnel con el método descrito por Bernard y cols (65). Este método basado en cuadrantes, describe la ubicación del túnel en ambos planos, estableciendo como normal la ubicación del LCA en una cifra



porcentual 25% (alto/bajo) y 25% (superficial/profundo) (Figura 17). Estas cifras son similares a las que presentamos en el segundo de los trabajos.

Otro de los aspectos a considerar es el grado de flexión de la rodilla en la identificación del punto de entrada y sobre todo en el brocado del túnel femoral. En nuestros 2 primeros estudios, el grado de flexión de la rodilla se estableció a 110°. Diferentes estudios defienden este grado de flexión (70, 73) ya que el aumento de esta flexión a 130° o más provoca un túnel muy angulado con respecto al punto de entrada en el intercóndilo provocando unas presiones demasiado importantes sobre la pared anterior del túnel. Otros trabajos, como el ya comentado de Pujol y cols. (61), sugieren que no hay peligro de lesionar estructuras posterolaterales de la rodilla a este grado de flexión. De todas maneras hiperflexionar la rodilla más allá de 110° es difícil según que rodillas.

Se ha establecido como la longitud mínima recomendable para un túnel femoral en 25 mm (70). El hecho de descender el túnel femoral provoca que los túneles sean más cortos (74), por lo cual el grado de flexión ha adquirido una mayor importancia a la hora de realizar este túnel. De lo que no parece haber duda, a tenor de la múltiple bibliografía reciente, es que restaurar la función del LCA con un túnel situado en su posición anatómica restaura la estabilidad rotatoria de la rodilla mejor que si es colocado en una posición no anatómica (42, 51, 52).

Las limitaciones de los 2 primeros estudios estaban en relación con que sólo se realizó el estudio a 110° de flexión y no se valoraron angulaciones alternativas. Además, en el primero de los estudios no se realizó una proyección radiológica lateral por lo que es difícil evaluar la ubicación del túnel en el plano sagital. El hecho que la guía de entrada del *Cross Pin* en el cóndilo lateral fuese sistemáticamente angulado en los recomendados 20° en dirección cefálica (60, 75) también limita las conclusiones a otras angulaciones posibles.

En resumen, la fijación de la plastia en el lado femoral con el dispositivo estudiado puede provocar lesiones en la región posterolateral de la rodilla cuando se realiza un túnel anatómico de 30 mm. Sin embargo, alargar el túnel femoral tanto como permita el cóndilo ha demostrado disminuir este riesgo.

### Trabajo n°3

#### Effectiveness of a footprint guide to establish an anatomic femoral tunnel in anterior cruciate ligament reconstruction: computed tomography evaluation in a cadaveric model

El principal hallazgo del tercero de los trabajos fue que la guía femoral *BullsEye* es más efectiva que la tradicional guía en escalón a la hora de situar un túnel lo más anatómico posible. Por otra parte se observó que el grado de flexión de la rodilla no tiene relación con la longitud del túnel, indistintamente de la guía usada. El grado de flexión de la rodilla a la hora de iniciar el brocado del túnel femoral sigue siendo motivo de controversia. Mientras tradicionalmente se ha definido que la hiperflexión de la rodilla aumenta la longitud del túnel (70, 61), recientemente Bedi y cols. (69) presentaron unos resultados opuestos, objetivando una reducción en la longitud del túnel al mismo tiempo que un mayor riesgo de lesión de la pared posterior del túnel. Este hallazgo fue atribuido al uso de la guía de escalón desde el portal AM. En nuestro estudio, aunque no se observaron diferencias significativas en cuanto a la longitud del túnel a uno y otro grado de flexión de la rodilla, la longitud observada en los túneles realizados con la ayuda de la guía *BullsEye* fue superior a los realizados con la guía de escalón. Incluso en 3 de los 10 túneles realizados a 110° con la guía de escalón se lesionaron parcialmente la pared posterior de los túneles y además estos túneles fueron menores de 25 mm. Esto sugiere que la guía *BullsEye* es más segura a la hora de realizar el túnel a este grado de flexión.

Respecto al método de imagen para valorar la posición del túnel femoral, Forsythe y cols. (67) describieron recientemente la posición de los dos haces del LCA en una reconstrucción en 3D-TC, mediante una adaptación del sistema del cuadrante. Obtuvieron una posición en el plano profundo/superficial de 21,7% y 35,1% para el haz AM y PL respectivamente y una posición respecto al plano alto/bajo de 33,2% y 55,3% para

el haz AM y PL respectivamente. En los resultados del tercero de nuestros estudios, con un único haz y mediante la guía de escalón, se obtuvo una mediana de 19,7% y 30,3% en el plano profundo/superficial y alto/bajo respectivamente. Estos resultados se asemejan a los resultados para el haz AM del trabajo de Forsythe y cols. Por otro lado, la ubicación del túnel con la guía *BullsEye* arroja unos resultados de 26,9% y 40,8% % en el plano profundo/superficial y alto/bajo respectivamente. Estos resultados corresponden a una posición intermedia óptima entre el haz AM y PL.

Una de las principales limitaciones de este estudio viene determinado por el número de especímenes estudiados. Este hecho posiblemente este en relación con que en varias comparaciones no se haya alcanzado una significación estadística. La otra limitación más importante fue debida a que sólo se utilizaron las guía *BullsEye* de 8 mm y la guía de escalón de 5 mm. Una guía en escalón de mayor tamaño podría acercar la ubicación del túnel a una posición más anatómica.





# CONCLUSIONES



## 5. CONCLUSIONES

### 1

#### **Anatomic single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction from the anteromedial portal: evaluation of transverse femoral fixation in a cadaveric model.**

La fijación de la plastia de isquiotibiales con el sistema *Cross Pin* desde un portal anteromedial a  $110^\circ$  de flexión y con un túnel de 30 mm colocado anatómicamente presenta un mayor riesgo de lesión del ligamento colateral lateral. Además, también aumenta el riesgo de lesión del tendón poplíteo y el tendón del gemelo lateral.

## 2

### **Effect of femoral tunnel length on the safety of anterior cruciate ligament graft fixation using cross-pin technique: a cadaveric study.**

La fijación de la plastia de isquiotibiales con el sistema *Cross Pin* ha demostrado ser segura cuando el túnel femoral se realiza desde un portal anteromedial a 110° de flexión, siempre que dicho túnel se realice tan largo como permita el cóndilo femoral lateral.

# 3

## **Effectiveness of a footprint guide to establish an anatomic femoral tunnel in anterior cruciate ligament reconstruction: computed tomography evaluation in a cadaveric model.**

La guía *BullsEye* ha sido más precisa que la guía de escalón estándar para situar el túnel femoral del LCA en una posición anatómica. Además, con la guía en escalón de 5 mm se obtuvieron túneles más cortos y con mayor riesgo de rotura de la pared posterior del túnel.

Por otro lado se observó que el grado de flexión de la rodilla no tiene relación con la longitud del túnel, indistintamente de la guía usada.





COPIA DE  
LOS TRABAJOS





## 6. COPIA DE LOS TRABAJOS

### TRABAJO Nº1.

# Anatomic Single-Bundle Anterior Cruciate Ligament Reconstruction From the Anteromedial Portal: Evaluation of Transverse Femoral Fixation in a Cadaveric Model

Pablo Eduardo Gelber, M.D., Ph.D., Francisco Reina, M.D., Ph.D., Raúl Torres, M.D., Xavier Pelfort, M.D., Marc Tey, M.D., and Juan Carlos Monllau, M.D., Ph.D.

**Purpose:** The purpose of this study was to assess the risk of injury to the posterolateral structures of the knee when performing anterior cruciate ligament reconstruction from the anteromedial portal while fixing the graft with a femoral cross-pin system. **Methods:** The anterior cruciate ligament was reconstructed arthroscopically with hamstring graft in 10 fresh cadaveric knees. Femoral fixation was performed with a cross-pin system. This was originally developed for a transtibial drilling technique. A femoral tunnel measuring 30 mm in length was drilled through the anteromedial portal in each knee. The knee flexion angle was set at 110°. Lateral dissection was then performed to measure the distances from the cross-pin system to the lateral collateral ligament, the popliteus tendon, the lateral gastrocnemius tendon, and the peroneal nerve. **Results:** The lateral collateral ligament was partially torn by the pin in 1 case. In 8 cases the distance to the lateral collateral ligament was shorter than 3 mm (range, 0 to 2.43 mm). In 7 specimens, the cross-pin system was within 4.5 mm of the popliteus tendon. The lateral gastrocnemius tendon was pierced by the cross-pin device in 2 cases. The minimal distance to the peroneal nerve was 23.89 mm. **Conclusions:** Fixation of a hamstring graft with a cross-pin system initially developed for an upper femoral tunnel, following the aforementioned technique, presents the possibility of a high risk of injury to the lateral collateral ligament. The popliteus tendon and the lateral gastrocnemius tendon may also be injured. **Clinical Relevance:** The risk of injury to the lateral stabilizers of the knee suggests discarding the technique used in this study.

The main function of the anterior cruciate ligament (ACL) has been accepted as being the principal restraint against anterior tibial displacement for years. More recently, the important role of the ACL in rota-

tory stability of the knee has been put forth.<sup>1-3</sup> It acts against combined rotatory loading of internal tibial and valgus torques. Consequently, the way surgeons reconstruct the ACL has changed according to new findings. For several years, performing femoral tunnel placement in the so-called over-the-top position was considered standard for ACL reconstruction.<sup>4,5</sup> Furthermore, anatomic studies<sup>6-8</sup> and biomechanical studies<sup>2,9,10</sup> have recently suggested that this might be an improvement over other femoral tunnel placements. Lowering the femoral tunnel from the 11-o'clock position to the 10-o'clock position has been shown to provide better control of the aforementioned rotatory instability.<sup>2,9,10</sup>

There are 2 major techniques for creating the femoral tunnel. One is drilling through the tibial tunnel (transtibial technique [TTT]), and the other is drilling through the anteromedial portal (anteromedial portal technique). Attempts to place the graft at the original

*From the Department of Orthopaedic Surgery, Hospital de la Santa Creu i Sant Pau (P.E.G., J.C.M.), Barcelona; and Department of Morphological Sciences (Anatomy and Embryology Unit), Faculty of Medicine (P.E.G., F.R.), Department of Orthopaedic Surgery, Hospital IMAS (R.T., X.P.), Institut Universitari Dexeus (X.P., M.T.), Universitat Autònoma de Barcelona, Cerdanyola del Vallès, Spain.*

*The authors report no conflict of interest.*

*Received March 9, 2009; accepted September 13, 2009.*

*Address correspondence and reprint requests to Pablo Eduardo Gelber, M.D., Ph.D., Department of Orthopaedic Surgery, Hospital de la Santa Creu i Sant Pau, Sant Antoni Maria Claret 167, 08025, Barcelona, Spain. E-mail: pgelber@sanpau.cat*

*© 2010 by the Arthroscopy Association of North America*

*0749-8063/10/2605-9133\$36.00/0*

*doi:10.1016/j.arthro.2009.09.020*

anatomic insertion site with a TTT show that this is not easily done.<sup>11,12</sup> It requires drilling the tibial tunnel from a more medial starting point. However, there is a risk of damage to the medial plateau cartilage because of the obliquity of the tunnel and of partial injury to the medial collateral ligament if the aforementioned approach is taken. The other solution would be to drill the femoral tunnel through a low anteromedial portal.<sup>12,13</sup>

Hamstring tendons have provided good results as a graft option for ACL reconstruction.<sup>14</sup> They can be secured proximally with different fixation techniques. One of these, the transverse femoral fixation system, was originally developed for drilling the femoral tunnel transtibially.<sup>15</sup> The transverse pins are placed percutaneously through the lateral femoral condyle, and this technique has been shown not to damage the surrounding anatomic structures<sup>16</sup> when femoral tunnel placement is performed in the high over-the-top position. Nevertheless, lowering the femoral tunnel could involve a risk of iatrogenic lesions to the posterolateral structures of the knee when drilling through the transverse guide. Pujol et al.<sup>17</sup> compared placement of the femoral tunnel transtibially with placement through the anteromedial portal at different flexion angles. They concluded that the anteromedial portal technique presents no risk when the knee is flexed at least 130°. However, they did not specify the exact position of the starting femoral point. Furthermore, they used the same femoral starting drilling point for both the TTT and the anteromedial portal technique. Therefore it can be hypothesized that the femoral tunnel was not placed in the anatomic position with either technique.

The aim of this study was to evaluate the risk of iatrogenic lesions when performing strict low femoral tunnel positioning from the anteromedial portal. The hypothesis is that when using the recommendations for tunnel length of the Cross-Pin technique (Stryker, Kalamazoo, MI), which was described for the TTT, the posterolateral structures could be put at risk.

## METHODS

We studied 11 whole lower-extremity fresh-tissue knees (6 left and 5 right) from adult human volunteer donors. Seven were from male donors and four from female donors. None of the knees showed macroscopic signs of previous surgery. One knee that showed a remarkable narrowing of the intercondylar notch during arthroscopic examination was excluded from the study. The remaining 10 specimens ranged in

age from 68 to 96 years (mean, 83.5 years). They were mounted on a knee holder (Extremity Holder; Sawbones, Malmö, Sweden).

By use of a long metal ruler, the longitudinal axis of the thigh, defined as the line passing through the greater trochanter and the lateral epicondyle, was marked with a skin pen. The longitudinal axis of the leg passing through the center of the fibular head and the lateral malleolus was also marked. A manual goniometer was used to measure the angle between the 2 lines so that the femorotibial flexion could be calculated.

The gracilis and semitendinosus tendons were harvested through a 30-mm longitudinal approach medial to the tibial tuberosity. A whipstitch suture was performed on each end of the tendons. A 0.8-mm copper wire was also included so that the sutures would be more easily recognized on later radiographic imaging. The diameter of the double-loop hamstring graft structure was then measured.

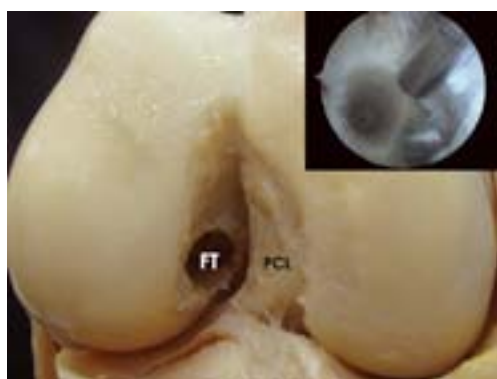
The experimental protocol was as follows: first, the ACL reconstruction was performed, and the transverse fixation was implanted. Second, a radiographic evaluation of the femoral tunnel position was done. Finally, dissection of the lateral aspect of the knee was performed, and the relation of the Cross-Pin device to the surrounding structures was evaluated.

## Arthroscopic Procedure

All arthroscopic procedures were performed by the same author. The knees hung freely at 90° of flexion except when the femoral tunnels were being drilled. A standard anterolateral portal was established as the viewing portal. A low anteromedial portal was then established as the working portal. The landmarks used to establish this portal were the inferior pole of the patella and a point 1 cm medial to the patellar tendon.

After complete excision of the ACL, the lateral wall of the intercondylar notch was cleared by use of a shaver. The tibial tunnel position was marked at the center of the ACL stump. Depending on the diameter of the hamstring graft, a 7- to 10-mm hole was made with a conventional step drill guide (ACL System; Stryker).

The starting point was always located 2 cm medial to the tibial tuberosity. The inclination angle on the sagittal plane was set at 55°. The deviation from the axis perpendicular to the tibial plateau in the frontal plane was 20°. Subsequently, the femoral tunnel was placed with a measured knee flexion of 110°. The corresponding offset femoral tunnel guide was se-



**FIGURE 1.** Anterior view of right knee. The femoral tunnel was drilled at the anatomic insertion point of the ACL. Inset, arthroscopic picture of same knee showing that only 1 to 2 mm of posterior wall was left behind the tunnel. (FT, femoral tunnel; PCL, posterior cruciate ligament.)

lected to leave 2 mm of posterior wall to approach the appropriate anatomic deep/shallow position<sup>18</sup> and to avoid blowout. The clock-face position was carefully established at the 10-o'clock position (right knee) or 2-o'clock position (left knee) with reference to the inside of the notch (Fig 1). This is known to be the intermediate point between the anteromedial and posterolateral bundles at the high/low position.<sup>19</sup> Following the recommendation for the Cross-Pin technique (Stryker), the femoral tunnel was drilled over the guide pin to a depth of 30 mm whenever possible. The transverse drill guide was then introduced into the femoral socket, and a pin was drilled percutaneously into the lateral aspect of the knee, 20° upward with reference to the horizontal plane. The hamstring graft was then introduced and fixed on the femoral side with either a 6 × 40- or 6 × 50-mm Biosteon (hydroxyapatite/poly-L-lactic acid) Cross-Pin (bCP) (Stryker). Tibial fixation was performed with a 7 × 25-mm or 10 × 25-mm standard metal screw.

#### Radiographic Evaluation

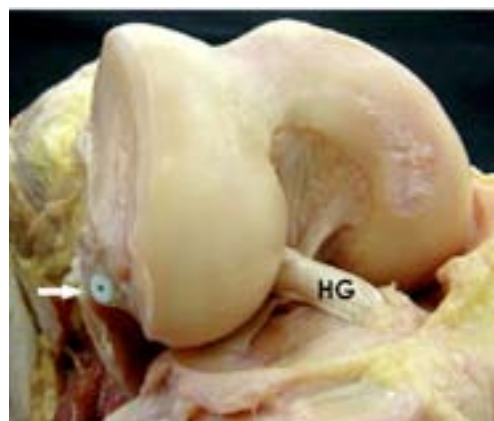
A tunnel-view radiograph was obtained for each specimen at 30° of knee flexion. In accordance with a recently described method, the femoral tunnel orientation with reference to a line tangent to the distal aspect of the femoral condyles was measured.<sup>20</sup> A computer software-generated clock face was then superimposed such that 12 o'clock was the highest point of the notch. The entry point of the pins was expressed

in hours and in quarter-hour intervals and normalized for each knee.

#### Dissection and Evaluation of Posterolateral Structures

Dissection was performed through a 20 × 15-cm ovoid-shaped skin incision centered on the lateral femoral condyle. The skin and subcutaneous tissue were excised. Identification of the fascia lata was then done. To easily assess the lateral aspect of the femur, the posterior half of the fascia lata was removed. Localization of the Cross-Pin device and careful dissection of the lateral aspect of the knee were performed to identify the following structures: lateral collateral ligament (LCL), lateral epicondyle, popliteus tendon (PT), lateral gastrocnemius tendon (LGT), and peroneal nerve (PN). After complete excision of the lateral attachments of the knee, distances from the pin to the anterior, posterior, and distal surfaces of the femur were also evaluated.

The shortest distance from the pin to the corresponding structures was then calculated twice by 2 of the authors and then averaged. All measurements were determined by use of an electronic digital caliper (ProMax; Fred V. Fowler, Newton, MA) (range, 0 to 150 mm; resolution, 0.02 mm). Finally, anterior dissection of the knee joint was performed to certify proper placement of the graft (Fig 2).



**FIGURE 2.** Lateral view of right knee, showing Cross-Pin (arrow) inserted into lateral condyle. The hamstring graft (HG) is seen running obliquely from the tibial tunnel, placed in the ACL stump, to the lateral condyle.

### RESULTS

In 2 of 10 specimens, the gracilis tendon was discarded because the poor quality of the tissue did not allow for its further manipulation. In 8 cases a 30-mm tunnel depth could be established. In the remaining 2 specimens, only 25- and 23-mm tunnel lengths could be established because of small lateral condyles. In the aforementioned cases, the posterolateral cortex of the femur was perforated. In the latter of the two (case 8), moderate narrowing of the intercondylar notch was observed. Notchplasty was not performed because of our impression that this moderate degree of narrowing would not influence the tunnel placement.

#### Radiographic Evaluation

The mean angle of the femoral tunnel orientation with reference to the bicondylar line was  $52.1^\circ$  (range,  $40^\circ$  to  $60^\circ$ ) (Fig 3). The average clock position was 10 o'clock (range, 9:15 to 10:30).

#### LCL and Lateral Epicondyle

The position of the bCP with respect to the LCL varied from one specimen to another. In 8 cases the Cross-Pin was placed posterior to the LCL (range, 0 to 7.96 mm; mean, 2.38 mm) (Fig 4). In 1 knee the LCL was partially torn by the bCP (case 9) (Fig 5). Nevertheless, this partial lesion did not produce varus instability under manual testing. In the remaining specimen, the pin was introduced into the femur just anterior to the LCL (case 8). In this specimen the femoral tunnel length was only 23 mm. This anterior

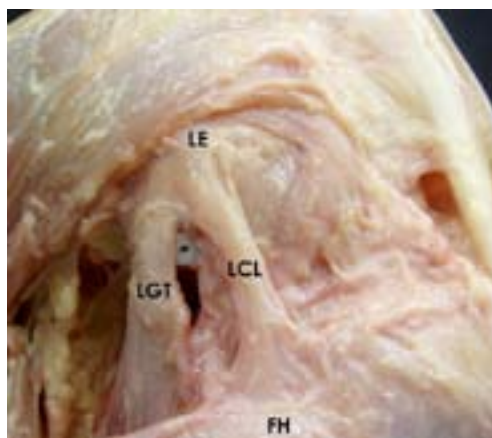


FIGURE 4. Lateral view of right knee, showing Cross-Pin inserted in lateral condyle. In this case it was placed right in the middle of the LCL and the PT. (LE, lateral epicondyle; FH, fibular head.)

deviation might partially be explained by its narrowed intercondylar notch, which could have altered the femoral tunnel guide positioning. In 8 cases the distance to the LCL was shorter than 3 mm (range, 0 to 2.43 mm). The distance from the pin to the lateral epicondyle averaged 13.86 mm (range, 6.41 to 19.04 mm).

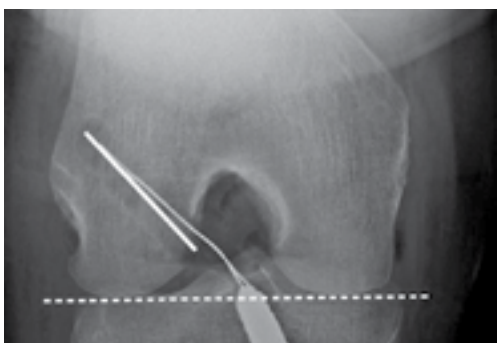


FIGURE 3. Notch-view radiograph of right knee (case 3). The femoral tunnel orientation (solid line) with reference to a line tangent to the distal aspect of the femoral condyles (dashed line) measured  $47^\circ$ . The center of the femoral tunnel, with respect to the clock-face position, was calculated to be at the 9:45 position.

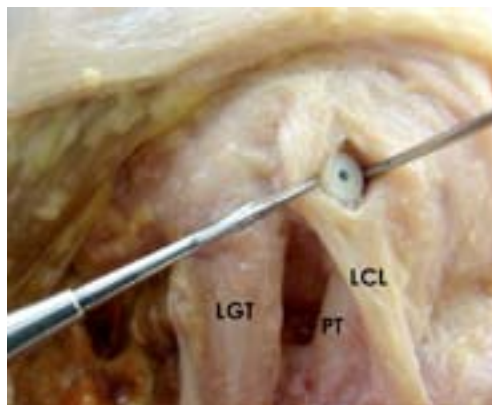


FIGURE 5. Torn LCL on lateral view of right knee (case 9). Both the anterior and posterior borders of the pierced ligament are retracted to show the pin placement.

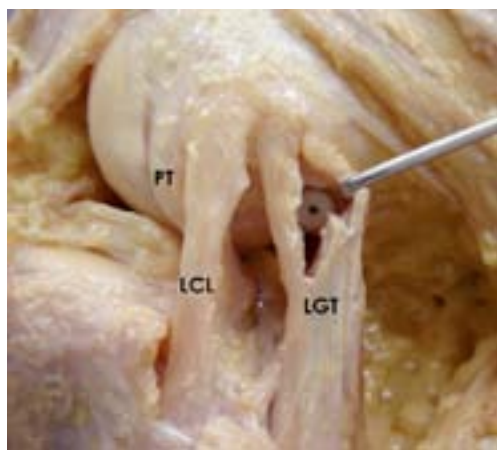


FIGURE 6. Torn LGT due to pin placement on lateral view in left knee (case 7).

### Popliteus Tendon

Similarly, the bCP was separated from the PT by as much as 1.47 mm in 3 specimens. The pin was at least 4.5 mm away in only 3 cases.

### Lateral Gastrocnemius Tendon

In 2 specimens the LGT was pierced by the bCP (Fig 6). The pin was placed just in contact with the anterior border of the tendon in another 4 cases.

### Peroneal Nerve

The minimal distance from the bCP to the PN was 23.89 mm (mean, 38.48 mm).

### Femoral Cortices

The mean distance to the anterior surface of the femur was 27.2 mm (range, 17.45 to 35.4 mm). The femur ended distally at a mean of 8.17 mm (range, 4.08 to 15.8 mm). In 1 case the bCP went right into the posterior cortex, with its posterior half facing the popliteal fossa. In 7 cases the Cross-Pin was within 1.52 mm of this posterior surface (mean, 1.35 mm). In the 2 remaining cases, where the pin was placed anteriorly (case 8) or in the middle of the LCL (case 9), the distance to the posterior cortex was 14.06 and 9.5 mm, respectively.

Under direct evaluation of the femoral tunnel, 2 mm of posterior wall was confirmed to be present in every knee. All frequencies are summarized in Table 1.

### DISCUSSION

The main finding of this study was that performing femoral tunnel placement at the anatomic insertion site from the anteromedial portal could cause iatrogenic lesions. The LCL is the main structure jeopardized. This is in contrast to the previous work performed by Hantes et al.<sup>21</sup> In their report of more than 30 ACL reconstructions from the anteromedial portal using the Bio-TransFix femoral fixation device (Arthrex, Naples, FL), they concluded that the technique is safe and effective. Nevertheless, they did not evaluate where the cross-pin device was placed with respect to the posterolateral structures. Furthermore, they did not specify the degree of knee flexion or the angulation of the transverse drill with respect to the horizontal plane. Our findings did not match the conclusion of the study by Pujol et al.<sup>17</sup> either. They

TABLE 1. Distances from Cross-Pin to Corresponding Structures

| Case No. | TL (mm) | LCL (mm) | LE (mm) | PT (mm) | LGT (mm) | PN (mm) | AC (mm) | PC (mm) | DC (mm) | TO (mm) | CFP   |
|----------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 1        | 30      | 8        | 18.9    | 7       | 0        | 32.9    | 31.5    | 1.8     | 4.1     | 50      | 10    |
| 2        | 30      | 2.4      | 12.9    | 12.6    | 0        | 32.3    | 27.1    | 0.7     | 6.3     | 56      | 10:15 |
| 3        | 25      | 0.9      | 10.9    | 4.5     | 5.2      | 51.9    | 33.7    | 0.9     | 9.2     | 47      | 9:45  |
| 4        | 30      | 2        | 15      | 4.4     | 4.3      | 30.6    | 35.4    | 1.3     | 6.6     | 60      | 10:30 |
| 5        | 30      | 0        | 13.6    | 3.9     | 0        | 37.5    | 24.5    | 1.8     | 8.9     | 53      | 10    |
| 6        | 30      | 0        | 12.4    | 3.3     | 0        | 39.1    | 24.8    | 1.5     | 15.8    | 50      | 10    |
| 7        | 30      | 5.7      | 19      | 9.5     | 0        | 46.4    | 30      | 0       | 7.2     | 57      | 10:15 |
| 8        | 23      | 0.4      | 17.2    | 0       | 11.9     | 39.5    | 21.5    | 14.1    | 6.4     | 44      | 9:15  |
| 9        | 30      | 0        | 6.4     | 0       | 3        | 50.8    | 17.4    | 9.5     | 9.1     | 55      | 10    |
| 10       | 30      | 0        | 12.3    | 1.5     | 0        | 23.9    | 26      | 1.5     | 8.3     | 49      | 10    |

Abbreviations: TL, tunnel length; LE, lateral epicondyle; AC, anterior cortex; PC, posterior cortex; DC, distal cortex; TO, tunnel orientation with reference to line tangent to distal aspect of femoral condyles; CFP, clock-face reference position.

concluded that there is no risk with the anteromedial portal technique when the knee is flexed at least 130°. However, they did not specify the exact position of the starting femoral point. Furthermore, they used the same femoral starting drilling point in the transtibial and the anteromedial portal techniques as shown in their illustrations. Drilling the femoral tunnel at the anatomic position is not safely accomplished with the TTT.<sup>11,12</sup> Placement of a low femoral tunnel, which could not have been reached with a TTT, was rigorously performed in all the specimens in our study. Therefore it can be speculated that what Pujol et al. placed was a high femoral tunnel near the high-noon point rather than performing an anatomic reconstruction.

In this study the evaluation of the notch-view radiographs and, most importantly, the direct evaluation of the intercondylar notch during the final dissection confirmed that the grafts were properly oriented around the anatomic insertional site at the 10-o'clock position and with 2 mm of posterior back wall, currently known as the high/low position and deep/shallow position, respectively. This is very similar to previous anatomic descriptions of the ACL femoral footprint.<sup>18</sup> It was also observed that the femoral tunnel angulations with reference to a line tangent to the distal aspect of the femoral condyles coincided with the results described in a previous study.<sup>20</sup> The clock-face reference method used for the femoral tunnel position has recently been criticized as a simple but inaccurate method of tunnel referencing.<sup>22</sup> It has been said that it only considers the high/low position but misses the shallow/deep reference. This may be correct when a double-bundle ACL reconstruction is being performed. In the case of single-bundle reconstruction, because the step femoral guide is always lying below the posterior wall at the very same degree of flexion, we believe that the cephalad/caudad orientation is the important factor in helping to perform tunnel placement in the clinical setting. In this sense the clock-face reference might still be valid.

The degree of knee flexion during drilling of the femoral tunnel is controversial. In this study the flexion angle for performing the femoral tunnel was set at 110°. Basdekis et al.<sup>20</sup> have recently shown that with 130° flexion or greater, the acuity of the tunnel with regard to the notch increases, leading to the graft increasing pressure on the anterior tunnel wall. Therefore they recommended 110° of knee flexion. This was also supported by recent work performed by Nishimoto et al.<sup>23</sup>

Basdekis et al.<sup>20</sup> have also recommended a minimum length of 25 mm for the femoral tunnel. In our study only 1 specimen showed a slightly shorter tunnel length. This could be partially explained by the fact that the moderate narrowing of the intercondylar notch forces excessive anterior placement of the femoral tunnel guide when it is used through the anteromedial portal, and consequently, the fixation device is also too anteriorly placed.

It has been shown that reconstructing the femoral tunnel at the center of the anatomic origin of the native ACL more closely restores rotational stability to the knee than does the standard tunnel reconstruction at the 11-o'clock position.<sup>2,9,10</sup>

There are some limitations to this study. Besides the aforementioned fact that we only performed the technique at a 110° knee flexion angle and the small sample size, radiographic lateral projections were not obtained. Thus the anterior-posterior situation of the femoral tunnel could not be evaluated radiographically. Nevertheless, the presence of a 2-mm posterior wall was confirmed under direct evaluation in the specimens. In addition, how varying the drill angles for the Cross-Pin insertion could affect the results was not studied. Finally, neither interobserver nor intraobserver reliability was calculated for the measurements.

Fixation of the graft on the femoral side with the Cross-Pin device, which was initially developed for an upper femoral tunnel, may lead to iatrogenic lesions when the femoral tunnel is lowered. In this study we followed the same tunnel length recommendations as in the original placement of the graft (11 o'clock). A 30-mm femoral tunnel showed a high risk of injury to the LCL as well as to the PT. In 2 of the 10 specimens studied, the Cross-Pin directly pierced the LGT. Nevertheless, these injuries may have no clinical relevance. On the other hand, this technique proved to be safe with respect to the PN, leaving a minimum distance of 24 mm. We do not recommend the technique used in this study because of this risk of injury to the important lateral stabilizers of the knee. One of the alternatives is to change to a femoral fixation method that was previously shown to be safe.<sup>24</sup> Another possibility might be to adapt the technique of the Cross-Pin system to a more lateralized fixation. This might hypothetically be accomplished with a longer femoral tunnel or with further knee flexion. Nevertheless, further basic research should be done before a broad recommendation can be made.



### CONCLUSIONS

Fixation of hamstring graft with the Cross-Pin system, originally designed for transtibial drilling when performing femoral tunnel placement from the anteromedial portal at 110° of knee flexion and with a tunnel length of 30 mm, shows a high risk of injury to the LCL. The PT and the LGT may also be injured.

### REFERENCES

1. Kanamori A, Woo SL, Ma CB, et al. The forces in the anterior cruciate ligament and knee kinematics during a simulated pivot shift test: A human cadaveric study using robotic technology. *Arthroscopy* 2000;16:633-639.
2. Loh JC, Fukuda Y, Tsuda E, Steadman RJ, Fu FH, Woo SL-Y. Knee stability and graft function following anterior cruciate ligament reconstruction: Comparison between 11 o'clock and 10 o'clock femoral tunnel placement. *Arthroscopy* 2003;3:297-304.
3. Markolf KL, Park S, Jackson SR, McAllister DR. Anterior-posterior and rotatory stability of single and double-bundle anterior cruciate ligament reconstructions. *J Bone Joint Surg Am* 2009;91:107-118.
4. Bylski-Austrow DI, Grood E, Hefzy M, Holden JP, Butler DL. Anterior cruciate ligament replacements: A mechanical study of femoral attachment location, flexion angle at tensioning and initial tension. *J Orthop Res* 1990;8:522-532.
5. Markolf KL, Hame S, Monte Hunter D, et al. Effects of femoral tunnel placement on knee laxity and forces in an anterior cruciate ligament graft. *J Orthop Res* 2002;5:1016-1024.
6. Giron F, Cuomo P, Aglietti P, Bull AMJ, Amis AA. Femoral attachment of the anterior cruciate ligament. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2006;14:250-256.
7. Petersen W, Zantop T. Anatomy of the anterior cruciate ligament with regard to its two bundles. *Clin Orthop Relat Res* 2006;454:35-47.
8. Kopf S, Musahl V, Tashman S, Szczodri M, Shen W, Fu FH. A systematic review of the femoral origin and tibial insertion morphology of the ACL. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2009;17:213-219.
9. Scopp JM, Jasper LE, Belkoff SM, Moorman CT III. The effect of oblique femoral tunnel placement on rotational constraint of the knee reconstructed using patellar tendon autografts. *Arthroscopy* 2004;3:294-299.
10. Musahl V, Plakseychuk A, VanScyoc A, et al. Varying femoral tunnels between the anatomical footprint and isometric positions. Effect on kinematics of the anterior cruciate ligament-reconstructed knee. *Am J Sport Med* 2005;5:712-718.
11. Arnold MP, Kooloos J, van Kampen A. Single-incision technique misses the anatomical femoral anterior cruciate ligament insertion: A cadaveric study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2001;9:194-199.
12. Gavrilidis I, Moutsis EK, Pakos EE, Georgoulis AD, Mitsionis G, Xenakis TA. Transtibial versus anteromedial portal of the femoral tunnel in ACL reconstruction: A cadaveric study. *Knee* 2008;15:364-367.
13. Harner C, Honkamp N, Ranawat AS. Anteromedial portal technique for creating the anterior cruciate ligament femoral tunnel. *Arthroscopy* 2008;24:113-115.
14. Harilainen A, Sandelin J. A prospective comparison of 3 hamstring ACL fixation devices—Rigidfix, BioScrew, and Intrafix—Randomized into 4 groups with 2 years of follow-up. *Am J Sport Med* 2009;37:699-706.
15. Clark R, Olsen RE, Larson BJ, Goble EM, Farrer RP. Cross-pin femoral fixation: A new technique for hamstring anterior cruciate ligament reconstruction of the knee. *Arthroscopy* 1998;3:258-267.
16. McKeon BP, Gordon M, DeConciliis G, Scheller A. The safe zone for femoral cross-pin fixation. An anatomical study. *J Knee Surg* 2007;20:285-288.
17. Pujol N, Thierry D, Bauer T, Hardy P. Transverse femoral fixation in anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction with hamstrings grafts: An anatomic study about the relationships between the transcondylar device and the posterolateral structures of the knee. *Knee Surg Sport Traumatol Arthrosc* 2006;14:724-729.
18. Colombet P, Robinson J, Christel P, et al. Morphology of anterior cruciate ligament attachments for anatomic reconstruction: A cadaveric dissection and radiographic study. *Arthroscopy* 2006;22:984-992.
19. Rue JP, Ghodadra N, Bach BR Jr. Femoral tunnel placement in single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: A cadaveric study relating transtibial lateralized femoral tunnel position to the anteromedial and posterolateral bundle femoral origins of the anterior cruciate ligament. *Am J Sports Med* 2008;36:73-79.
20. Basdekis G, Abisafi C, Christel P. Influence of knee flexion angle on femoral tunnel characteristics when drilled through the anteromedial portal during anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy* 2008;4:459-464.
21. Hantes M, Dailiana Z, Zachos V, Varitimidis S. Anterior cruciate ligament reconstruction using the Bio-Transfix femoral fixation device and anteromedial portal technique. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2006;14:497-501.
22. Fu FH. The clock-face reference: Simple but nonanatomic. *Arthroscopy* 2008;24:1433, author reply 1434.
23. Nishimoto K, Kuroda R, Mizuno K, et al. Analysis of the graft bending angle at the femoral tunnel aperture in anatomic double bundle anterior cruciate ligament reconstruction: A comparison of the transtibial and the far anteromedial portal technique. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2009;17:270-276.
24. Neven E, D'Hooghe P, Bellemans J. Double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: A cadaveric study of the posterolateral tunnel position and safety of the lateral structures. *Arthroscopy* 2008;4:436-440.

## TRABAJO N°2.

# Effect of Femoral Tunnel Length on the Safety of Anterior Cruciate Ligament Graft Fixation Using Cross-Pin Technique

## A Cadaveric Study

Pablo Eduardo Gelber,<sup>\*†‡</sup> MD, PhD, Francisco Reina,<sup>§</sup> MD, PhD, Raúl Torres,<sup>||</sup> MD, and Juan Carlos Monllau,<sup>†</sup> MD, PhD

From the <sup>†</sup>Department of Orthopaedic Surgery, Hospital de Sant Pau, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, Spain, the <sup>‡</sup>Department of Morphological Sciences (Anatomy and Embryology Unit), Faculty of Medicine, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, Spain, the <sup>§</sup>Department of Medic Sciences (Anatomy Section), Faculty of Medicine, Universitat de Girona, Girona, Spain, and the <sup>||</sup>Department of Orthopaedic Surgery, Hospital Universitari del Mar, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, Spain

**Background:** A more oblique placement of the anterior cruciate ligament (ACL) graft has been related to better control of rotatory knee stability. Femoral fixation with a transverse system might injure its posterolateral structures.

**Hypothesis:** A cross-pin system, originally developed for transtibial reconstruction of the ACL, can safely be used when creating a lower femoral tunnel through the anteromedial portal. However, a long femoral tunnel must be created to protect the posterolateral structures of the knee.

**Study Design:** Controlled laboratory study.

**Methods:** An ACL was arthroscopically reconstructed with a hamstring graft in 22 fresh cadaveric knees. The femoral tunnel was anatomically drilled in all cases. Knee flexion angle was set at 110°. Femoral fixation was performed with a cross-pin system. A 30-mm-long femoral tunnel was created in 11 knees (group A). In the remaining 11 knees, the femoral tunnel was drilled as long as each lateral condyle permitted (group B). For both groups, the relationships were compared between the cross-pin and the lateral collateral ligament (LCL), popliteus tendon, articular cartilage, and peroneal nerve.

**Results:** In 5 cases of group A, the cross-pin was placed either through the LCL or between the LCL and popliteus tendon, whereas in group B it was always posterior to the LCL ( $P = .035$ ). The cross-pin was closer to the articular cartilage in group A than in group B (7.14 mm versus 16.9 mm;  $P < .001$ ). The minimal distance to the peroneal nerve in all specimens was 23.89 mm.

**Conclusion:** Hamstring graft fixation with a cross-pin system from the anteromedial portal with a 30-mm femoral tunnel presents a higher risk of injury to the LCL. The femoral tunnel should be drilled as long as possible.

**Clinical Relevance:** A long femoral tunnel is required for safe transverse femoral fixation in an anatomical ACL reconstruction.

**Keywords:** posterolateral structures; anatomical single bundle; anterior cruciate ligament reconstruction risk; transverse fixation; hamstring graft

\*Address correspondence to Pablo Eduardo Gelber, MD, PhD, Department of Orthopaedic Surgery, Hospital de Sant Pau, Universitat Autònoma de Barcelona, C/Sant Antoni Maria Claret, 167, 08025 Barcelona, Spain (e-mail: pablogelber@gmail.com).

The authors declared that they had no conflicts of interests in their authorship and publication of this contribution.

The American Journal of Sports Medicine, Vol. 38, No. 9  
DOI: 10.1177/0363546510366229  
© 2010 The Author(s)

Reconstructions of the anterior cruciate ligament (ACL) are currently among the most frequently performed knee surgery procedures. More than 100 years after A. W. Robson performed the first-known ACL surgery,<sup>28</sup> many aspects of ACL reconstruction still remain somewhat controversial. The ACL is well recognized as the main restraint against anterior tibial displacement. It has been advocated that this function is well reproduced by fixing the ACL graft high in the femoral notch at about the 11-o'clock position,

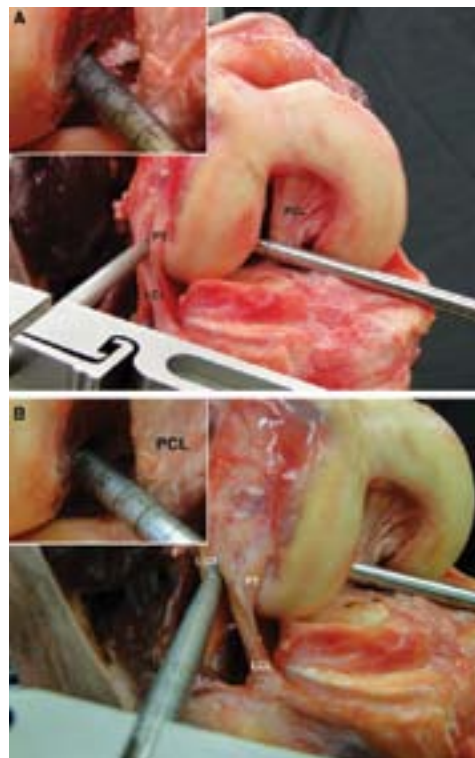


the leading technique during the past 20 years.<sup>5</sup> However, this nonanatomical femoral tunnel placement is not so effective at successfully restoring the original ACL rotatory stability.<sup>18</sup> Recent biomechanical studies have demonstrated that lowering the femoral tunnel to a more horizontal and anatomical position is more effective at preserving this property.<sup>21,24,31</sup>

There are 2 major techniques for creating the femoral tunnel: first, drilling through the tibial tunnel, or the transtibial technique; second, drilling through the anteromedial portal, or the anteromedial portal technique. Placing the graft at the original anatomical insertion site with a transtibial technique is not always easily done.<sup>1,2,11</sup> It requires drilling the tibial tunnel from a more medial and proximal starting point.<sup>2,11</sup> However, there is not only a potential risk of damage to the medial plateau cartilage, owing to the obliquity of the tunnel, but also a risk of partial injury to the medial collateral ligament<sup>2</sup> in taking the aforementioned approach. Moreover, the tibial tunnel obtained might not be long enough to guarantee secure fixation.<sup>11</sup> Drilling the femoral tunnel through a low anteromedial portal would be another option for placing the graft anatomically.<sup>11,14</sup>

Transverse femoral fixation is a popular method for fixation of soft tissue graft. It was originally designed for drilling the femoral tunnel transtibially and placing the tunnel at a higher location.<sup>7</sup> The transverse pins are placed percutaneously through the lateral femoral condyle and have been shown not to damage the surrounding anatomical structures when the femoral tunnel is placed at the high 11-o'clock position (right knee).<sup>22</sup> Lowering the femoral tunnel to the exact anatomical insertion site makes the entry of the cross-pin lower and lateral. It presents a risk of iatrogenic lesion to the posterolateral structures of the knee. Strategies for making transverse pin fixation safer include angling the pins upward<sup>22</sup> and hyperflexing the knee.<sup>3,25</sup> Pujol et al<sup>27</sup> compared performing the femoral tunnel transtibially to performing it through the anteromedial portal at different flexion angles with the Biotransfix cross-pin (Arthrex, Naples, Florida). They concluded that the anteromedial portal technique presents no risk when the knee is flexed at least 130°. Other authors have criticized the degree of knee flexion.<sup>3,26</sup> Pujol et al<sup>27</sup> did not specify the exact position of the starting femoral point; furthermore, they performed the same starting femoral drilling point in the transtibial technique as in the anteromedial portal technique. We can therefore hypothesize that the femoral tunnel was not placed at the anatomical position in either technique.

To evaluate whether the cross-pin system can be safely used when drilling the femoral tunnel through the anteromedial portal, we performed a pilot study on 2 cadaveric knees. We observed that the main difference occurred when we compared the technique with the usual femoral tunnel lengths, 30 mm and longer (Figure 1). On the basis of these findings, we hypothesize that in some knees, a 30-mm femoral tunnel is not long enough and it might damage the posterolateral structures. The aim of this work was to investigate and compare the standard 30-mm tunnel length versus longer tunnels.



**Figure 1.** Lateral view of a right knee in the pilot study: A, the femoral tunnel was drilled 30 mm (see the upper left corner), and the transverse system was placed near the lateral stabilizers of the knee; B, in the same knee, the femoral tunnel was drilled 40 mm (see upper left corner), and the system was more posterior and farther away from the lateral stabilizers of the knee. PCL, posterior cruciate ligament; PT, popliteus tendon; LCL, lateral collateral ligament.

## MATERIALS AND METHODS

The pilot study used 2 fresh-frozen cadaveric human knees from 2 male donors, one 76 years old and the other 79 years old. The present study used 22 fresh-frozen cadaveric human knees from 14 male donors and 8 female donors whose ages ranged from 62 to 93 years (mean, 76.6). The specimens had been stored at  $-18^{\circ}\text{C}$ ; they were then thawed at room temperature for 24 to 36 hours before testing. None of the knees showed macroscopic signs of previous surgery. Preoperative mobility, measured with the goniometer, gave maximum flexion ranging from  $120^{\circ}$  to  $135^{\circ}$ . Full extension remained possible. Two knees showed remarkable narrowing of the intercondylar notch during the arthroscopic examination and thus had to be excluded from the study and replaced with 2 other knees. The femur

and the tibia were cut approximately 30 cm from the joint line, with all the soft tissue around the knee left intact. They were mounted on a knee holder (Extremity Holder, Sawbones, Malmö, Sweden).

With a long metal ruler and skin pen, the longitudinal axis of the thigh was marked—specifically, the line passing through the middle of the femoral shaft and lateral epicondyle—as was the longitudinal axis of the leg, which passed through the center of the fibular head and shaft. A manual goniometer was used to measure the angle between the 2 lines so that femorotibial flexion could be calculated.

The pilot approach with 2 specimens was carried out first. This was performed with open surgery. The 2 knees were stripped of skin, subcutaneous tissue, fascia lata, quadriceps muscle, and the knee capsule. A 9-mm femoral tunnel was then drilled at the femoral stump of the ACL up to the femoral posterior cortex, to avoid breaking through it. The transverse drill guide was then introduced. Two K-wires were then transversally implanted 20° upward with reference to the horizontal plane. One K-wire was introduced 30 mm into the femoral tunnel socket through the transverse drill guide, and the other went as deep as the tunnel allowed.

The gracilis and the semitendinosus tendons were harvested through a 30-mm longitudinal approach medial to the tibial tuberosity. A whipstitch suture was performed on each end of the tendons. The diameter of the double-loop hamstring graft structure was then measured. In those cases with a diameter wider than 9 mm, only the semitendinosus tendon was used for ACL reconstruction.

The experimental protocol was as follows: First, the ACL reconstruction was performed and the transverse fixation implanted. Second, a radiographic evaluation was done of the femoral tunnel. Finally, dissection was performed of the lateral aspect of the knee, and the relationship of the cross-pin device to the surrounding structures was evaluated.

The knees had been randomized into 2 groups: a 30-mm femoral tunnel socket was performed for the 11 knees composing group A; for those 11 knees making up group B, the femoral tunnel was drilled as long as the lateral condyle permitted in each case.

#### Arthroscopic Procedure

The same author (P.E.G.) performed all the arthroscopic procedures. The knees hung freely at a 90° of flexion, except when the femoral tunnels were being drilled. A high anterolateral portal was established as the viewing portal, then a low anteromedial portal as the working portal. The latter portal was established as inferiorly (ie, close to the tibia) as possible with the help of a spinal needle and under direct visualization to avoid injuring the anterior horn of the medial meniscus. In addition, the portal was as medial as possible without injuring the medial femoral condyle. After complete excision of the ACL, whenever present, the lateral wall of the intercondylar notch was cleared with the help of a shaver. The tibial tunnel position was marked at the center of the ACL stump. A 9-mm hole was made with a conventional step drill guide (ACL System, Stryker Corp, Mahwah, New Jersey). The starting

point was always performed 2 cm medial to the tibial tuberosity. The inclination angle on the sagittal plane was set at 55°. The deviation from the axis perpendicular to the tibial plateau in the frontal plane was 20°. The femoral tunnel was subsequently performed. A 7-mm offset femoral tunnel guide was selected to leave 2.5 mm of posterior wall to approach the anatomical deep/shallow position. The high/low position was calculated following the clock-face reference position. The guide was carefully placed at the 10-o'clock (right knees) and 2-o'clock (left knees) positions with the knees at 90° of tibiofemoral flexion, and the starting point was marked—namely, the intermediate point between the anteromedial and posterolateral bundles on the high/low position.<sup>29</sup> The knee was then flexed to 110°, and the femoral tunnel was drilled over the guide pin. Based on the recommendation of the cross-pin technique (Stryker Corp), the femoral tunnel was drilled over the guide pin to a depth of 30 mm in 11 specimens (group A). In the remaining 11 knees (Group B), the tunnel was drilled over the guide pin along the lateral condyle and stopped when the posterior cortex was reached, to not break through it. The transverse drill guide was then introduced into the femoral socket as deeply as the previously determined tunnel length (at 30 mm in group A or at the maximum tunnel length in group B), and a pin was drilled percutaneously into the lateral aspect of the knee, 20° upward with reference to the horizontal plane. The hamstring graft was then introduced and fixed in the femoral side with a 6- × 50-mm Biosteon (HA/PLLA) Cross-Pin (Stryker Corp; hereafter, BCP). Tibial fixation was performed securing the suture's end of the distal part of the hamstring to the periosteum and fat tissue surrounding the entry site of the tibial tunnel.

#### Radiographic Evaluation

The relative position of the femoral tunnel in the notch was first evaluated with a conventional lateral radiograph, which was obtained for each knee. The posterior femoral condyle outlines should overlap as accurately as possible, and a 6-mm deviation from overlapping was suggested to be the limit of acceptable malalignment.<sup>9</sup> Analysis of the entry placement of the femoral tunnel was performed according to the quadrant method described by Bernard et al.<sup>4</sup> The femoral tunnel was further evaluated with a tunnel view radiograph for each specimen at 30° of knee flexion. Its orientation was measured with reference to a line tangent to the distal aspect of the femoral condyles. A computer software-generated clock face was then superimposed such that 12 o'clock was the highest point of the notch. The center entry of the femoral tunnel was expressed in hours and quarter-hour intervals and normalized for each knee. An experienced radiologist independent to the study made all the measurements.

#### Dissection and Posterolateral Structures Evaluation

Dissection was performed through a 20- × 15-cm skin incision window centered on the lateral femoral condyle. The

skin and subcutaneous tissue were removed. The fascia lata was identified and removed to more easily assess the lateral aspect of the femur. Localization of the cross-pin device and careful dissection of the lateral aspect of the knee were performed to identify the following structures: the lateral collateral ligament (LCL), lateral epicondyle, popliteus tendon (PT), lateral gastrocnemius tendon (LGT), and peroneal nerve (PN). The zone of the lateral aspect of the femur where the bio cross-pin was located was qualified according to its relationship to the LCL. Those cases where the pin was placed posterior to the LCL were classified as being in the safe zone; when the cross-pin device was across or anterior to the LCL, it was classified as being in the unsafe zone. After removal of the lateral soft tissue of the knee, with the exception of the LCL and PT, the distance was evaluated from the pin to the posterior surface of the femur and to the articular cartilage (AC).

The shortest distance from the pin to the corresponding structures was then calculated. All measurements were determined with the help of an electronic digital caliper (ProMax, Fowler, Newton, Massachusetts; range, 0 to 150 mm; resolution, 0.02 mm). Finally, anterior dissection of the knee joint was performed to further certify proper placement of the graft.

#### Statistical Analysis

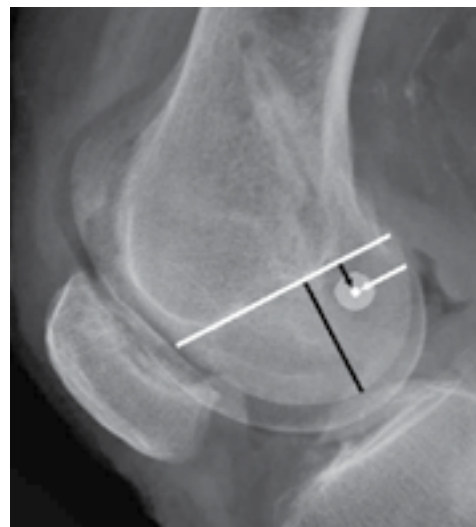
Categorical variables are presented as percentages and frequencies. Either the chi-square Pearson or Fisher exact test was used to compare these variables between groups. For each continuous variable, mean and standard deviation as well as median and quartiles were calculated. Because of the small sample number and the difficulty in determining whether the variables were adjusted to a normal distribution, the Mann-Whitney test was used to compare the measurements in both groups. These continuous variables are presented as a median. Statistical analysis was performed using SPSS 15. Statistical significance was set at the .05 level.

#### RESULTS

In 10 of 11 cases in group A (90.1%), a 30-mm tunnel depth was performed. For the remaining specimen, only a 27-mm tunnel length could be done because of its small lateral condyle. In this case, the posterolateral cortex of the femur was perforated. In the 11 knees in group B, the femoral tunnel length ranged from 28 to 45 mm (median, 38 mm).

#### Femoral Tunnel Position

Radiographic evaluation revealed the anatomical placement of the femoral tunnel in each knee of both groups. Analysis of the lateral radiograph with the quadrant method showed that the deep/shallow position and high/low position, respectively, had a median of 25.6% and 35.3% for group A and a median of 25.7% and 34.6% for group B ( $P = .519$  and  $.797$ , respectively) (Figure 2).



**Figure 2.** Lateral radiograph of a right knee. According to the quadrant method, the femoral tunnel in this case was performed at the deep/shallow position (white arrow) and the high/low position (black arrow) of 25.6% and 32.7%, respectively.

Analysis of the posteroanterior tunnel view radiograph revealed that the median angle of the femoral tunnel orientation with reference to the bicondylar axis was  $53^\circ$  for group A and  $51^\circ$  for group B ( $P = .300$ ). The clock-face position reflected a median of 10 o'clock for both groups ( $P = .898$ ).

#### LCL and Lateral Epicondyle

The position of the BCP with respect to the LCL varied from one specimen to the other. The main finding was relative to the aforementioned zone classification. The pin was introduced in the unsafe zone in 5 specimens of group A (45% of the cases). In every knee corresponding to group B, the pin was always placed in the safe zone ( $P = .035$ ). In 3 knees of group A where the BCP was in the unsafe zone, it was introduced into the femur just between the LCL and the PT (Figure 3). In the remaining 2 knees with the pin in the unsafe zone, the LCL was partially torn by the BCP. Even so, these partial lesions did not produce varus instability under manual testing in either knee. The median distance from the pin to the LCL was 1.08 mm in group A and 5.57 in group B ( $P = .002$ ). The median distance from the pin to the lateral epicondyle was similar in both groups (13.63 mm versus 13.62 mm,  $P = .519$ ).

#### Popliteus Tendon

As easily deduced from the zone classification results, the cross-pin was considerably closer to the PT in group A



**Figure 3.** Lateral view of a right knee in group A. The pin (white arrow) is seen placed in the unsafe zone. It was introduced into the femur between the lateral collateral ligament and the popliteus tendon. The popliteus tendon is retracted to show the pin placement. In the upper left corner, arthroscopic picture of the same knee showing a 30-mm femoral tunnel drilling. LGT, lateral gastrocnemius tendon; LCL, lateral collateral ligament; PT, popliteus tendon.

(median, 1.47 mm) than in group B (median, 11.17 mm;  $P < .001$ ).

#### Lateral Gastrocnemius Tendon

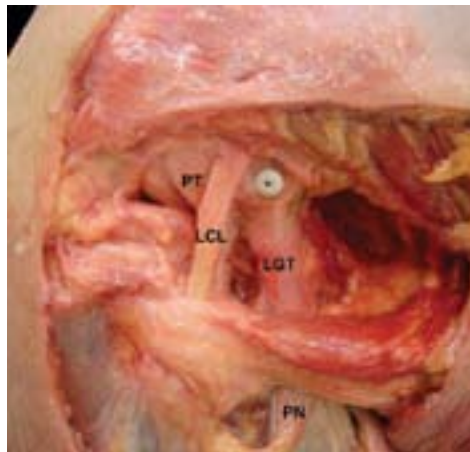
Conversely, the cross-pin was closer to the LGT in group B (median, 0.31 mm) than in group A (median, 5.20 mm;  $P = .028$ ). In 2 specimens in group A and in 3 in group B, the BCP pierced the LGT (Figure 4), in all cases around the origin of the tendon. In most knees of group B, the pin was introduced into the femur just anterior to the LGT.

#### Peroneal Nerve

The minimal distance from the BCP to the PN was 23.89 mm. The cross-pin was at a considerable distance in all knees in group A (mean, 37.52 mm) and group B (41.19 mm;  $P = .27$ ).

#### Articular Cartilage and Posterior Femoral Cortex

The AC was closer to the cross-pin in group A. The distance from the pin to the AC in this group had a median of 7.17 mm, whereas the median was 17.18 mm in group B ( $P < .001$ ). The minimal distance was observed in a case in group A, where the pin was 3.57 mm from the AC. As can be deduced from the relationship of the other structures, the BCP was closer to the posterior surface of the femur in group B (median, 1.52 mm) than in group A (median, 4.65 mm  $\pm$  4.9;  $P = .043$ ). Table 1 summarizes the most relevant measurement values between the 2 groups. Under direct evaluation of the femoral tunnel, anatomical placement of the graft was confirmed in each knee (Figure 5).



**Figure 4.** Lateral view of a left knee in group B. The cross-pin is inserted in the safe zone, near the origin of the lateral gastrocnemius tendon. Note the considerable distance to the peroneal nerve. LCL, lateral collateral ligament; LGT, lateral gastrocnemius tendon; PT, popliteus tendon; PN, peroneal nerve.



**Figure 5.** Anteromedial view of a right knee. The hamstring graft (HG) is seen running obliquely from the tibial tunnel, placed in the anterior cruciate ligament stump, to the anatomical insertion site in the medial wall of the lateral condyle.

#### DISCUSSION

This study demonstrated that securing a hamstring graft with a transverse femoral fixation system can be safely done when drilling the femoral tunnel at its anatomical insertion site. A longer femoral socket appears to have reduced the risk of iatrogenic injury to the LCL.

This finding is in partial agreement with the work performed by Hantes et al.<sup>13</sup> In their report of more than 30 ACL reconstructions using the anteromedial portal and

TABLE 1  
Distances From the Cross-Pin to the Anatomic Structures<sup>a</sup>

|                              | Mean | SD  | Min  | Max  | Percentiles |      |      | P      |
|------------------------------|------|-----|------|------|-------------|------|------|--------|
|                              |      |     |      |      | 25          | 50   | 75   |        |
| Lateral collateral ligament  |      |     |      |      |             |      |      |        |
| Group A                      | 1.5  | 2.7 | 0.0  | 8.0  | 0.0         | 1.1  | 2.0  | .002   |
| Group B                      | 5.5  | 2.9 | 1.5  | 9.6  | 2.9         | 5.8  | 8.2  |        |
| Popliteus tendon             |      |     |      |      |             |      |      |        |
| Group A                      | 2.8  | 3.3 | 0.0  | 9.5  | 0.0         | 1.5  | 4.5  | < .001 |
| Group B                      | 11.8 | 2.9 | 7.9  | 17.5 | 8.9         | 11.2 | 14.1 |        |
| Lateral gastrocnemius tendon |      |     |      |      |             |      |      |        |
| Group A                      | 5.4  | 5.4 | 0.0  | 15.9 | 0.0         | 5.2  | 8.3  | .028   |
| Group B                      | 0.47 | 1.4 | 0.0  | 4.9  | 0.0         | 0.3  | 0.7  |        |
| Peroneal nerve               |      |     |      |      |             |      |      |        |
| Group A                      | 38.5 | 8.7 | 23.9 | 51.8 | 31.4        | 37.5 | 46.4 | .27    |
| Group B                      | 42.1 | 7.2 | 32.9 | 52.9 | 34.7        | 41.2 | 51.2 |        |
| Articular cartilage          |      |     |      |      |             |      |      |        |
| Group A                      | 7.1  | 1.9 | 3.6  | 9.2  | 6.3         | 7.2  | 8.8  | < .001 |
| Group B                      | 16.9 | 3.9 | 9.3  | 22.8 | 14.9        | 17.2 | 19.2 |        |

<sup>a</sup>All data expressed in millimeters.

Bio-TransFix femoral fixation device, they concluded that the technique was safe and effective. However, they did not evaluate the placement of the cross-pin device with respect to the posterolateral structures, nor did they evaluate the effect of differing femoral tunnel depths, given that they always drilled a 35-mm tunnel socket. Furthermore, they did not specify the degree of knee flexion or the angulation of the transverse drill with respect to the horizontal plane. Similarly, a study by Pujol et al<sup>27</sup> lacked some critical technical details. They concluded that there is no risk with the anteromedial portal technique when the knee is flexed at least 130°, but they did not specify technical factors that might aid the surgeon—namely, the exact positioning of the starting femoral point. They performed the same femoral starting point in both the transtibial and the anteromedial portal technique, as shown in their drawings. Drilling the femoral tunnel at the low anatomical position is not easily accomplished with the standard transtibial technique.<sup>1,2,11</sup> In the current study, a low femoral tunnel, which could not have been reached with a transtibial technique, was rigorously performed in all the specimens. We can therefore speculate that what Pujol et al<sup>27</sup> performed was a high femoral tunnel near the high-noon point, rather than an anatomical reconstruction.

In the present study, the evaluation of the lateral and notch view radiographs and, most important, the direct evaluation of the intercondylar notch during the final dissection confirmed that the grafts were properly oriented around the anatomical insertion site. We also observed that the femoral tunnel angulations with reference to a line tangent to the distal aspect of the femoral condyles coincided with the results described in a previous study.<sup>3</sup> The clock-face reference method used for the femoral tunnel position has been criticized as a simple but inaccurate method of tunnel referencing<sup>10</sup>—specifically, that it only considers the high/low position but misses the shallow/

deep reference. This might be more important at the time of radiographic evaluation of the femoral tunnel position or when a double-bundle reconstruction is being performed. In the case of single-bundle reconstruction, the step femoral guide always lies below the posterior wall at the same degree of flexion; as such, we believe that the cephalad/caudad orientation is the important one when creating the tunnel in a clinical setting. In this sense, the clock-face reference position might still be valid. It is at the time of evaluation of the lateral radiography when the high/low and shallow/deep references are most important in the setting of anatomical single-bundle ACL reconstruction. The method described by Bernard et al<sup>4</sup> has been demonstrated to better localize the femoral tunnel in both planes. This quadrant method was described to define the center of the femoral insertion site of the ACL on conventional lateral radiographs. Four distances are measured on a lateral radiograph: The relationship between the total sagittal diameter of the lateral condyle measured along the Blumensaat line and the distance from the center of the ACL to the most dorsal subchondral contour of the lateral femoral condyle allows for the calculation of the deep/shallow reference. The relationship between the maximum intercondylar notch height and the distance from the center of the ACL to the Blumensaat line are used to calculate the high/low reference. With this quadrant method, the center of the ACL attachment at the lateral femur condyle was originally described as being located at 25% (high/low) and 25% (deep/shallow). Later on, it was shown that the high position is around 8% (high/low) and 38% (deep/shallow) whereas the anatomical site is localized at 40% (high/low) and 25% (deep/shallow),<sup>24,33</sup> which is similar to our findings. In the current study, a notch view radiograph was included in the protocol because it has been suggested that performing only lateral radiographs is insufficient to verify 3-dimensional placement of the tunnel and that an

anteroposterior radiograph may help in further evaluation of its position.<sup>8</sup>

The degree of knee flexion during drilling of the femoral tunnel is controversial. Pujol et al<sup>27</sup> suggested that there is no risk with the anteromedial portal technique when the knee is flexed at least 130°. Basdekis et al<sup>3</sup> recently demonstrated that the tunnel acuity increases with 130° or more of flexion. In such a case, the graft might increase pressure on the anterior tunnel wall and produce a subsequent widening of the femoral tunnel. Therefore, they recommended 110° of knee flexion. This finding is supported by the recent work performed by Nishimoto et al,<sup>26</sup> who suggested that the abrasive force by the sharp edge of the bone tunnel aperture when the graft is acutely bent and stretched might lead to graft failure. Nevertheless, this has not been proven clinically. Furthermore, flexing the knee more than 110° is sometimes difficult when the patient is positioned supine, with both legs hanging free at 90° flexion, one of the most common positions for knee surgery. These reasons support the use of a 110° flexion angle for performing the femoral tunnel in the present study. The knee flexion angle used while determining graft placement has been demonstrated to have some effect on positional accuracy. It has been shown that 90° of knee flexion provided the best results in terms of minimizing displacement from the appropriate location.<sup>16</sup> In the present study, placement of the graft was first determined with the knee at 90° of flexion. The starting point was marked; the knee was flexed to 110°; and the femoral tunnel was drilled.

A minimum length of 25 mm for the femoral tunnel is currently recommended.<sup>3</sup> Lowering the femoral tunnel is performed at the expense of a significantly shortened femoral tunnel.<sup>12</sup> To compensate for this, high-degree knee flexion angles have been advocated. It has been demonstrated that the greater the knee flexion, the longer the tunnel obtained.<sup>3</sup> As shown in the work of Basdekis et al<sup>3</sup> and this study, a femoral tunnel of at least 25 mm can be systematically achieved at 110° of knee flexion. Persistent rotatory instability has been shown to result in an inferior subjective functional outcome and earlier articular degeneration.<sup>17</sup> Therefore, looking for a technique that could reduce this stability deficit might be mandatory. Several studies have recently compared the clinical results between ACL double-bundle reconstruction and single-bundle reconstruction.<sup>23,32</sup> These researchers have concluded that the double-bundle reconstruction was more effective at successfully restoring the original ACL rotatory stability. Nevertheless, in these studies, the ACL in the single-bundle group was reconstructed at the high 11-o'clock position. It has also been demonstrated, biomechanically, that placing the femoral tunnel in a single-bundle technique at the center of the anatomical origin of the ACL more closely restores rotational stability to the knee than does the standard tunnel reconstruction at the 11-o'clock position.<sup>21,24,31</sup> It has more recently been shown that an anatomical femoral tunnel-placed single-bundle reconstruction reproduced anteroposterior and rotational stability as effectively as double-bundle reconstruction in biomechanical<sup>15</sup> as well as clinical studies.<sup>19,30</sup>

In the McKeon et al<sup>22</sup> study, the safe zone for cross-pin fixation consisted of placing the guide facing 20° to 40°

upward. They warned of a high risk of vascular injury if the pin is introduced angling downward. Similarly, Castoldi et al<sup>6</sup> demonstrated the high risk of femoral chondral injury if the pin is introduced in a caudad direction. In considerations of these recommendations, the cross-pin was introduced in a 20°-of-cephalad direction in the current study.

There are a few limitations to the present study. First, we performed the technique at only 110° of knee flexion, although some reports have suggested that higher degrees of flexion might be safer. However, one purpose of the present study was to determine if the technique could be safely performed at a lower angle of knee flexion. Second, although varying the drill angles for the cross-pin insertion could affect the results, the femoral transverse drill angle was fixed at 20° cephalad; as such, the effect was not studied.

Fixation of the graft in the femoral side with a cross-pin system device, initially designed for use with an upper transtibially drilled femoral tunnel, may lead to iatrogenic injury when the femoral tunnel is lowered. In the present study, we compared 2 femoral tunnel lengths. In group A, we followed the recommendations given when the tunnel is drilled at the 11-o'clock position. This 30-mm femoral tunnel demonstrated a high risk of injury to the LCL and the PT. Conversely, when the femoral tunnel was drilled as deep as the lateral condyle allowed, the technique was shown to be safe and reproducible for transverse fixation. Although some risk of injury to the LGT was observed in these cases, piercing this big tendon-belly muscle should not have any remarkable clinical consequence. A windshield wiper effect may be one deleterious consequence of these longer tunnels secondary to moving the fixation point further from the aperture.<sup>20</sup> Pujol et al<sup>27</sup> suggested that the solution is not to increase the depth of the femoral tunnel but to flex the knee at least 130°. Although we did not evaluate degrees of knee flexion other than 110°, it has been shown that the system can be safely used at this degree following the technique performed in group B. In some of the specimens studied in both groups, the cross-pin directly pierced the LGT. Nevertheless, this may have no clinical relevance. However, this technique proved to be safe with respect to the PN, leaving a minimum distance of 24 mm, and to the AC, particularly when the femoral socket is drilled longer than 30 mm.

The current study shows that fixation of hamstring graft with a cross-pin system is safe when drilling the femoral tunnel anatomically from the anteromedial portal at 110° of knee flexion and with the longest possible tunnel. Conversely, if the femoral tunnel socket is drilled only 30 mm, it might lead to injury to the LCL and the PT. Our hypothesis is confirmed. Therefore, the former technique is recommended for safe transverse femoral fixation in anatomic ACL reconstruction.

#### ACKNOWLEDGMENT

We thank Cynthia Scheidt, Pau Rigol, and Felix Vilches for their help in the arthroscopic procedures and anatomical dissections. We are also grateful to Sergi Mojal for assisting in the statistical analysis.



## REFERENCES

1. Alburquerque RF, Amatzuzi MM, Pacheco AP, Angelini FJ, Campos O Jr. Positioning of the femoral tunnel for arthroscopic reconstruction of the anterior cruciate ligament: comparative study of two techniques. *Clinics*. 2007;62:613-618.
2. Arnold M P, Kooloos J, van Kampen A. Single-incision technique misses the anatomical femoral anterior cruciate ligament insertion: a cadaveric study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2001;9:194-199.
3. Basdekis G, Abisafi C, Christel P. Influence of knee flexion angle on femoral tunnel characteristics when drilled through the anteromedial portal during anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy*. 2008;24:459-464.
4. Bernard M, Hertel P, Hornung H, Cierpinski T. Femoral insertion of the ACL: radiographic quadrant method. *Am J Knee Surg*. 1997;10:14-21.
5. Bylski-Austrow DI, Grood E, Hefzy M, Holden JP, Butler DL. Anterior cruciate ligament replacements: a mechanical study of femoral attachment location, flexion angle at tensioning and initial tension. *J Orthop Res*. 1990;8:522-531.
6. Castoldi F, Bonasia DE, Marmotti A, Dettoni F, Rossi R. ACL reconstruction using the Rigidfix femoral fixation device via the anteromedial portal: a cadaver study to evaluate chondral injuries. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2008;16:275-278.
7. Clark R, Olsen RE, Larson BJ, Goble EM, Farrer RP. Cross-pin femoral fixation: a new technique for hamstring anterior cruciate ligament reconstruction of the knee. *Arthroscopy*. 1998;14:258-267.
8. Cole J, Brand JC Jr, Caborn DN, Johnson DL. Radiographic analysis of femoral tunnel position in anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Knee Surg*. 2000;13:218-222.
9. Dargel J, Schmidt-Wiethoff R, Fisher S, Mader K, Koebke J, Schneider T. Femoral bone tunnel placement using the transtibial tunnel or the anteromedial portal in ACL reconstruction: a radiographic evaluation. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2009;17:220-227.
10. Fu FH. The clock-face reference: simple but nonanatomic. *Arthroscopy*. 2008;24:1433.
11. Gavrilidis I, Motsis EK, Pakos EE, Georgoulis AD, Mitsionis G, Xenakis TA. Transtibial versus anteromedial portal of the femoral tunnel in ACL reconstruction: a cadaveric study. *Knee*. 2008;15:364-367.
12. Golish SR, Baumfeld JA, Schoderbek RJ, Miller MD. The effect of femoral tunnel starting position on tunnel length in anterior cruciate ligament reconstruction: a cadaveric study. *Arthroscopy*. 2007;23:1187-1192.
13. Hantes M, Dailiana Z, Zachos V, Varitimidis S. Anterior cruciate ligament reconstruction using the Bio-Transfix femoral fixation device and anteromedial portal technique. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2006;14:497-501.
14. Harner C, Honkamp N, Ranawat AS. Anteromedial portal technique for creating the anterior cruciate ligament femoral tunnel. *Arthroscopy*. 2008;24:113-115.
15. Ho JY, Gardiner A, Shah V, Steiner ME. Equal kinematics between central anatomic single-bundle and double-bundle anterior cruciate ligament reconstructions. *Arthroscopy*. 2009;25:464-472.
16. Hoshino Y, Nagamune K, Yagi M, et al. The effect of intra-operative knee flexion angle on determination of graft location in the anatomic double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2009;17:1052-1060.
17. Jonsson H, Riklund-Ahlström K, Lind J. Positive pivot shift after ACL reconstruction predicts later osteoarthritis: 63 patients followed 5-9 years after surgery. *Acta Orthop Scand*. 2004;75:594-599.
18. Kanamori A, Woo SL, Ma CB, et al. The forces in the anterior cruciate ligament and knee kinematics during a simulated pivot shift test: a human cadaveric study using robotic technology. *Arthroscopy*. 2000;16:633-639.
19. Kanaya A, Ochi M, Deie M, Adachi N, Nishimori M, Nakamae A. Intra-operative evaluation of anteroposterior and rotational stabilities in anterior cruciate ligament reconstruction: lower femoral tunnel placed single-bundle versus double-bundle reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2009;17:907-913.
20. Kurosaka M, Yoshiya S, Andrich JT. A biomechanical comparison of different surgical techniques of graft fixation in anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med*. 1987;15:225-229.
21. Loh JC, Fukuda Y, Tsuda E, Steadman RJ, Fu FH, Woo SL-Y. Knee stability and graft function following anterior cruciate ligament reconstruction: comparison between 11 o'clock and 10 o'clock femoral tunnel placement. *Arthroscopy*. 2003;19:297-304.
22. McKeon BP, Gordon M, DeConciliis G, Scheller A. The safe zone for femoral cross-pin fixation: an anatomical study. *J Knee Surg*. 2007;20:285-288.
23. Muneta T, Koga H, Mochizuki T, et al: A prospective randomized study of 4-strand semitendinosus tendon anterior cruciate ligament reconstruction comparing single-bundle and double-bundle techniques. *Arthroscopy*. 2007;23:618-628.
24. Musahl V, Plakseychuk A, VanScyoc A, et al. Varying femoral tunnels between the anatomical footprint and isometric positions: effect on kinematics of the anterior cruciate ligament-reconstructed knee. *Am J Sports Med*. 2005;5:712-718.
25. Nakamura M, Deie M, Shibuya H, et al. Potential risk of femoral tunnel drilling through the far anteromedial portal: a cadaveric study. *Arthroscopy*. 2009;25:481-487.
26. Nishimoto K, Kuroda R, Mizuno K, et al. Analysis of the graft bending angle at the femoral tunnel aperture in anatomic double bundle anterior cruciate ligament reconstruction: a comparison of the transtibial and the far anteromedial portal technique. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2009;17:270-276.
27. Pujol N, Thierry D, Bauer T, Hardy P. Transverse femoral fixation in anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction with hamstrings grafts: an anatomic study about the relationships between the transcondylar device and the posterolateral structures of the knee. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2006;14:724-729.
28. Robson AW. VI: Ruptured crucial ligaments and their repair by operation. *Ann Surg*. 1903;37:716-718.
29. Rue JP, Ghodadra N, Bach BR Jr. Femoral tunnel placement in single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: a cadaveric study relating transtibial lateralized femoral tunnel position to the anteromedial and posterolateral bundle femoral origins of the anterior cruciate ligament. *Am J Sports Med*. 2008;36:73-79.
30. Sastre S, Popescu D, Núñez M, Pomes J, Tomas X, Peidro L. Double-bundle versus single-bundle ACL reconstruction using the horizontal femoral position: a prospective, randomized study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2010;18:32-36.
31. Scopp JM, Jasper LE, Belkoff SM, Moorman CT III. The effect of oblique femoral tunnel placement on rotational constraint of the knee reconstructed using patellar tendon autografts. *Arthroscopy*. 2004;3:294-299.
32. Siebold R, Dehler C, Ellert T. Prospective randomized comparison of double-bundle versus single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy*. 2008;24:137-145.
33. Zantop T, Wellmann M, Fu FH, Petersen W. Tunnel positioning of anteromedial and posterolateral bundles in anatomic anterior cruciate ligament reconstruction: anatomic and radiographic findings. *Am J Sports Med*. 2008;36:65-72.

## TRABAJO N°3

# Effectiveness of a Footprint Guide to Establish an Anatomic Femoral Tunnel in Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Computed Tomography Evaluation in a Cadaveric Model

Pablo Eduardo Gelber, M.D., Ph.D., Juan Erquicia, M.D., Ferrán Abat, M.D.,  
Raúl Torres, M.D., Xavier Pelfort, M.D., Alfonso Rodriguez-Baeza, M.D.,  
Xavier Alomar, M.D., and Juan Carlos Monllau, M.D., Ph.D.

**Purpose:** To compare drilling the femoral tunnel with an offset aimer and BullsEye guide (ConMed Linvatec, Largo, FL) to perform an anatomic single-bundle reconstruction of the anterior cruciate ligament (ACL) through the anteromedial portal. **Methods:** Seven matched pairs of cadaveric knees were studied. The intent was to drill the femoral tunnel anatomically in all cases. In group A the femoral tunnel was drilled arthroscopically with an offset aimer. In group B the femoral tunnel was drilled arthroscopically with the BullsEye guide. Two tunnels were drilled through the same entry point in each knee. One was done at 110° of knee flexion and the other at 130°. They were scanned by computed tomography and reconstructed 3-dimensionally. Volume-rendering software was used to document relations of the drilled tunnel to the bony anatomy and tunnel length. **Results:** In group B the femoral tunnel was placed at the center of the femoral insertion site. The center of the tunnel was 9.4 mm from the high cartilage margin and 8.6 mm from the low cartilage margin. In group A the tunnels were placed deeper (5.4 mm and 12.6 mm, respectively) ( $P = .018$ ). There were no differences in tunnel length for either knee flexion degree. Three of the tunnels drilled at 110° in group A compromised the posterior tunnel wall and measured less than 25 mm in length. **Conclusions:** Accurate placement in the center of the femoral footprint of the ACL is better accomplished with the BullsEye guide rather than 5-mm offset aimers. Five-millimeter offset aimers might cause posterior tunnel blowout and present the risk of obtaining short tunnels when performing oblique femoral tunnel placement through the anteromedial portal at 110° of knee flexion. **Clinical Relevance:** The BullsEye guide might be better than standard offset aimers in the performance of anatomic single-bundle ACL reconstruction.

From the Department of Orthopaedic Surgery, Hospital de Sant Pau (P.E.G., F.A., J.C.M.), Department of Morphological Sciences (Anatomy and Embryology Unit), Faculty of Medicine (P.E.G., A.R.-B.), Institut Universitari Dexeus (P.E.G., J.E., X.P., J.C.M.), and Department of Orthopaedic Surgery, Parc de Salut Mar (R.T., X.P.), Universitat Autònoma de Barcelona; and Department of Radiology, Creu Blanca (X.A.), Barcelona, Spain.

The authors report no conflict of interest.

Received June 19, 2010; accepted February 4, 2011.

Address correspondence to Pablo Eduardo Gelber, M.D., Ph.D., Department of Orthopaedic Surgery, Hospital de Sant Pau, Universitat Autònoma de Barcelona, C/ Sant Antoni Maria Claret, 167-08025 Barcelona, Spain. E-mail: pablogelber@gmail.com

© 2011 by the Arthroscopy Association of North America

0749-8063/10364/\$36.00

doi:10.1016/j.arthro.2011.02.004

Fixation of the anterior cruciate ligament (ACL) high in the notch has been the leading technique over the last 20 years.<sup>1</sup> However, this nonanatomic femoral tunnel placement cannot satisfactorily achieve the required rotatory knee stability.

There are 2 widely used techniques for creating the femoral tunnel. One is performed by drilling through the tibial tunnel (transtibial technique), and the other is performed by drilling through the anteromedial (AM) portal (AM portal technique). Placing the graft at the center of the anatomic insertion site with a transtibial technique is not always easily done.<sup>2-4</sup> Some surgeons have advocated independent drilling of the femoral tunnel. Thus drilling the femoral tunnel through a low accessory AM portal has become another option for placing the graft anatomically.<sup>5,6</sup>



There are also different methods to aid in drilling the femoral tunnel. Whereas some surgeons drill the tunnel over a guidewire inserted directly at the desired femoral site,<sup>7</sup> others insert the guidewire with the help of femoral drill guides. One of the drill guides, the standard femoral offset aimer, was originally developed to assist in establishing sufficient posterior placement of the femoral tunnel when drilling with a transtibial technique while minimizing the risk of posterior blowout. Although new specific AM portal offset guides have been developed by industry in recent years to better assist anatomic reconstruction, many authors who have changed to an AM portal drilling technique are still using standard offset femoral aimers.<sup>8-12</sup> Guides other than those based on the distance to the posterior cortex have also been developed. One of them, the BullsEye Femoral Footprint guide (ConMed Linvatec, Largo, FL), has a window at its oval end for easy visualization of the desired guide pin placement (Fig 1). This guide also allows the surgeon to pre-visualize where the femoral tunnel with its final size will be after drilling. The precision and potential advantages of this new guide have never been objectively evaluated.

With regard to the evaluation of tunnel placement, Purnell et al.<sup>13</sup> have recently described the ACL femoral insertion site through the use of high-resolution computed tomography (CT) with 3-dimensional (3D) reconstructions and volume-rendering software. Recently, evaluating the placement of the tunnels in ACL reconstruction with this technique has become more popular, and proper anatomic tunnel placement on 3D



FIGURE 1. BullsEye Femoral Footprint guide. Its open tip allows for easy visualization of the femoral footprint. Inset, Complete BullsEye guide.

CT images has been described by Basdekis et al.<sup>14</sup> Forsythe et al.<sup>15</sup> have also very recently defined the position of anatomic femoral tunnels on 3D CT reconstruction images by adapting the quadrant method described by Bernard et al.<sup>16</sup> on lateral standard radiographs.

The aim of this work was to compare a standard offset femoral aimer versus the BullsEye guide in the performance of an anatomic single-bundle reconstruction through the AM portal with CT images. Another goal was to define the length of the femoral tunnels placed at 2 different degrees of knee flexion. The last purpose was to assess the safety of both aimers in guiding the femoral tunnel drilling at 2 different degrees of knee flexion.

The first hypothesis of the study was that the BullsEye guide, in comparison to the offset femoral aimer, would allow for a more anatomic placement of the femoral tunnel. The second hypothesis was that higher knee flexion would allow for longer femoral tunnels.

## METHODS

Seven matched pairs of whole-lower extremity fresh knees from cadaveric volunteer donors were studied. There were 4 male donors and 3 female donors, whose ages ranged from 54 to 85 years (mean, 76 years). The specimens had been stored at  $-18^{\circ}\text{C}$ . They were then thawed at room temperature for 24 to 36 hours before testing. None of the knees showed macroscopic signs of previous surgery or degenerative changes. Preoperative mobility, measured with a goniometer, showed minimum flexion of  $135^{\circ}$ . Full extension was still possible. The specimens were mounted on a knee holder (Extremity Holder; Sawbones, Malmö, Sweden).

By use of a long metal ruler, the longitudinal axis of the thigh—defined as the line passing through the greater trochanter and the lateral epicondyle—was marked with a skin pen. The longitudinal axis of the leg passing through the center of the fibular head and the lateral malleolus was also marked. A manual goniometer was used to measure the angle between the 2 lines so that femorotibial flexion could be calculated.

One of the knees of a pair was assigned to receive a femoral tunnel drilled with a standard 5-mm offset aimer (group A), whereas the other was assigned to receive a femoral tunnel drilled with the help of the newly designed BullsEye guide. The matched pairs were used to minimize anatomic differences between specimens.

### Arthroscopic Procedure

All surgical procedures were carried out by the same surgeon under the supervision and with the agreement of 2 of the other authors. Only when the 3 experienced surgeons agreed on tunnel placement was the tunnel drilled. The knees hung freely at 90° of flexion except when the femoral tunnels were being drilled. A high anterolateral portal was established as the initial viewing portal. A parapatellar AM portal was also then created as a viewing portal so that the medial wall of the lateral condyle could be better seen. Finally, an accessory AM portal was established as the working portal. This portal was set as distally as possible with the help of a spinal needle under direct visualization to avoid injuring the anterior horn of the medial meniscus. In addition, the portal was placed as medial as possible without injuring the medial femoral condyle.

After excision of the ACL, the lateral wall of the intercondylar notch was cleared with the help of a shaver, leaving 1 to 2 mm of the ACL femoral stump.

In group A the femoral tunnel placement was selected with the help of a 5-mm offset aimer (Fig 2A). The clock-face position was carefully placed at the 10-o'clock (right knees) and 2-o'clock (left knees) positions with reference to the inside of the notch. This is known to be the intermediate point between the AM and posterolateral (PL) bundles in the high/low position.<sup>17</sup> In group B the femoral tunnel placement was selected with the help of the BullsEye femoral guide (Fig 2B). Its open design allows for easy viewing of the ACL femoral footprint. The center of the tunnel was drilled at an intermediate point between the AM and PL femoral footprints or in the center of the lateral bifurcate ridge when this had been clearly identified. In each of the knees of both groups, the procedure was as follows: (1) a 2.5-mm K-wire was drilled at 110° of knee flexion and subsequently over-reamed with a 5-mm cannulated reamer; (2) the K-wire was drilled at the same entry point but at 130° of knee flexion, and then it was also over-reamed to 5 mm; and (3) the first 10 to 15 mm of the entry point of the femoral tunnel was over-reamed to 8 mm. This was done to obtain better mapping of the anatomic single-bundle reconstruction on 3D CT imaging analysis because this 8-mm tunnel diameter is commonly seen in the clinical setting (Fig 3). This was also performed at 130° of knee flexion.

### CT Scanning

All knees were placed in full extension and imaged on multiple planes on a Toshiba Aquilon CT Scan

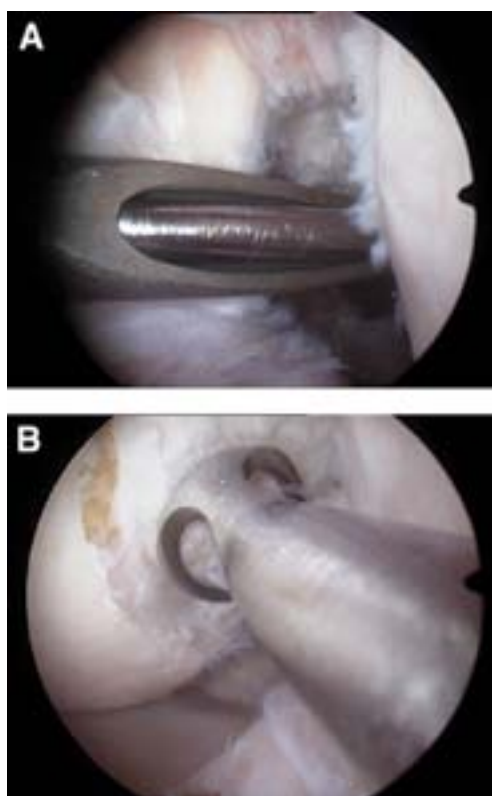


FIGURE 2. (A) Arthroscopic view of right knee from anterolateral portal. In group A the femoral tunnel was drilled with assistance from an offset aimer. (B) Arthroscopic view of left knee from AM portal. In group B the BullsEye guide aided the proper placement of the femoral tunnel.

TSX-101A (Toshiba Medical Systems, Tochigi-Ken, Japan) to generate high-resolution 3D images of the placed tunnels. EFilm Workstation 2.1.2 integrated view and processing software (Merge Healthcare, Hartland, WI) allowed for the removal of the medial femoral condyle to visualize the lateral wall of the intercondylar notch. Images that were coplanar with the tunnels were also analyzed. One radiologist, an expert in musculoskeletal imaging, performed all measurements twice and then averaged them. The following parameters, all of them expressed in millimeters, were measured in all matched-pair knees:

- The shortest distance from the center of the 8-mm tunnel to the posterior margin of the articular cartilage (deep in the notch) was calculated. This was



**FIGURE 3.** Arthroscopic view of right knee. Two divergent 5-mm tunnels are seen. The lower tunnel was placed at 110° of knee flexion (a), whereas the other tunnel was drilled at 130° (b). The first 15 mm of the entry point was over-drilled to 8 mm (arrows).

called the distance to the proximal cartilage margin (DPCM). This measurement was based on the studies performed by Colombet et al.<sup>2</sup> and Basdekis et al.<sup>14</sup>

- The shortest distance from the center of the 8-mm tunnel to the anteroinferior margin of the articular cartilage (low in the notch) was calculated. This was called the distance to the distal cartilage margin (DDCM) (Fig 4). This measurement was based on the same study as the DPCM.<sup>2,14</sup>
- The position of the tunnel was calculated with the quadrant method described by Forsythe et al.<sup>15</sup> On a true medial view of the femur established at 90° of knee flexion, a 4 × 4 grid was applied to the 3D CT images. Following the recommendations of Forsythe et al., the most anterior edge of the femoral notch roof was chosen as the reference for the grid alignment.

The previously mentioned measurements were calculated on the reconstructed 3D images. The following measurements were calculated on selected images that were coplanar with the tunnel to allow for a direct measurement from the intra-articular to the extra-articular apertures:

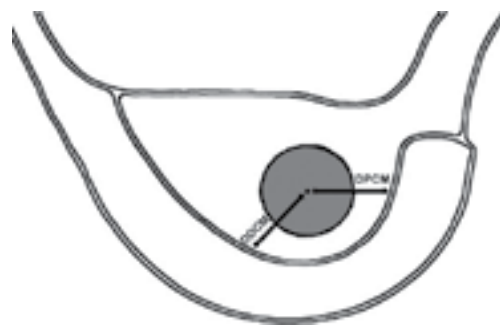
- The length of the 2 tunnels in each knee was measured, i.e., the tunnel length drilled at 110° of knee flexion in group A or B and the tunnel length drilled at 130° of knee flexion in group A or B. Because lateral femoral condyles have a rounded shape and the tunnel is not drilled orthogonally, the measured length may vary depending on whether the anterior

or posterior border of the tunnel is used as the reference. Therefore the tunnel length was measured in the center of the tunnel. Tunnels shorter than 25 mm, which is the minimum length recommended,<sup>9,10,18</sup> were recorded.

- The divergence angle (TDA) between the tunnel drilled at 110° of knee flexion and the tunnel drilled at 130° of knee flexion was calculated.
- The shortest distance between both tunnels in the exit point at the lateral femoral cortex was calculated from coplanar images.
- Posterior wall compromise was defined by any breach in the posterior cortical wall of the tunnel that was evident on any CT image.

#### Statistical Analysis

Categorical variables are presented as percentages and frequencies. For each continuous variable, mean and standard deviation as well as median and quartiles were calculated. Because of the small sample number and the difficulty of determining whether the variables were or were not adjusted to a normal distribution, the paired nonparametric Wilcoxon test was used to compare the measurements in both groups. These continuous variables are presented as medians. Statistical analysis was performed with SPSS software, version 15 (SPSS, Chicago, IL). Statistical significance was set at the .05 level.



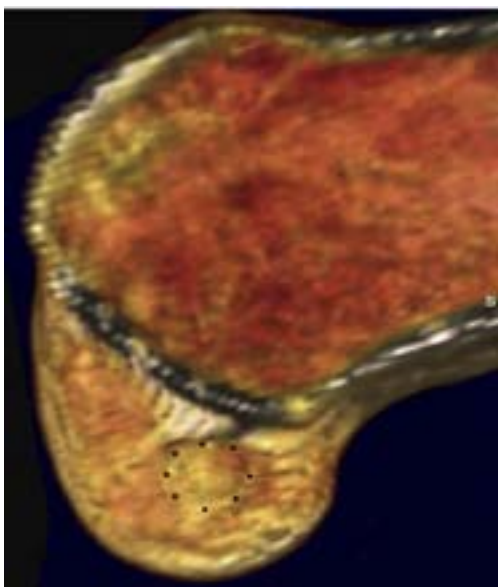
**FIGURE 4.** Morphometric parameters of tunnel positioning measured on lateral wall of intercondylar notch. The DPCM's arrow corresponds to the shortest distance from the center of the tunnel to the posterior margin (deep in the notch) of the articular cartilage. The DDCM's arrow corresponds to the shortest distance from the center of the tunnel to the anteroinferior margin (low in the notch) of the articular cartilage.

**RESULTS**

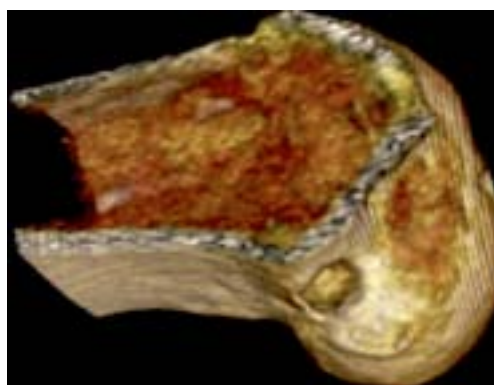
In group B the femoral tunnel was at about the midpoint of the medial wall of the lateral condyle in the sagittal plane (deep/shallow position) (Fig 5). On the other hand, the femoral tunnels drilled in the specimens corresponding to group A were placed deeper and right near the posterior cortical wall (Fig 6). In group B the median DPCM was 9.4 mm and the median DDCM was 8.6 mm. On the other hand, the median DPCM was 5.4 mm and the median DDCM was 12.6 mm in group A ( $P = .018$  for both measurements). These results are summarized in Table 1. Similarly, when the deep/shallow position was analyzed with the quadrant method on 3D scan images,<sup>15</sup> the tunnel was deeper in group A (19.7%) than in group B (26.9%) ( $P = .018$ ).

Analysis of the coronal plane showed that tunnels placed in group A had a median high/low position of 30.3%. In group B the tunnels were placed lower, at a median high/low position of 40.8% ( $P = .018$ ).

The tunnel length showed no differences when we compared the tunnels of both groups drilled at either



**FIGURE 5.** Three-dimensional CT scan reconstruction. In the BullsEye group (group B), the drilled single tunnel was generally in the center of the femoral footprint, as shown in this sample. A dotted circle was added to better aid in distinguishing the drilled tunnel.



**FIGURE 6.** Three-dimensional CT scan image. The location of the tunnel aperture center in the 5-mm standard offset aimer group (group A) was generally established deep in the notch, as shown in this specimen.

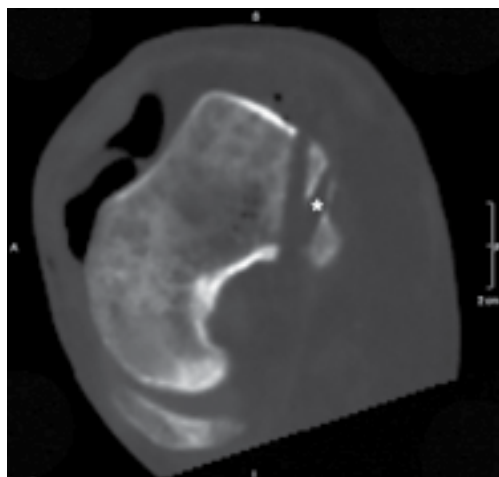
110° ( $P = .18$ ) or 130° ( $P = .24$ ) of knee flexion. There was also no statistical difference when comparing them within the same groups (group A,  $P = .091$ ; group B,  $P = .15$ ). However, 3 of the tunnels drilled at 110° of knee flexion with the offset aimer (group A) were shorter than 25 mm (17, 20, and 23.1 mm) (Fig 7). Table 2 provides a summary of the different tunnel length measurements.

The tunnels drilled at 110° and 130° of knee flexion diverge from each other in the same proportion to the same degree. The TDA was 15.6° in group A and 17.9° in group B ( $P = .18$ ). Similarly, the distance from the lateral exit point of the tunnels placed at 110° of knee flexion to the tunnels placed at 130° of knee flexion was equivalent when comparing 1 group with the other. The median TDA was 15.6 mm in group A and 17.9 mm in group B ( $P = .73$ ).

**TABLE 1.** Distances From Center of Drilled Femoral Tunnels to Cartilage Margin in Lateral Wall of Intercondylar Notch With Standard 5-mm Offset Aimer (Group A) and With BullsEye Guide (Group B)

|             | Minimum (mm) | Maximum (mm) | Median (mm) |
|-------------|--------------|--------------|-------------|
| <b>DPCM</b> |              |              |             |
| Group A     | 4.7          | 6.7          | 5.4         |
| Group B     | 8.5          | 14           | 9.4         |
| <b>DDCM</b> |              |              |             |
| Group A     | 10.1         | 16.1         | 12.6        |
| Group B     | 7.2          | 10.9         | 8.6         |

Abbreviations: DPCM, distance to proximal (deep) cartilage margin; DDCM, distance to distal (low) cartilage margin.



**FIGURE 7.** CT scan image, coplanar with both tunnels. The posterior tunnel (asterisk), which was drilled with the help of the offset aimer at 110° of knee flexion, measured only 23 mm in length.

Finally, the tunnels drilled at 110° of knee flexion caused partial compromise of the posterior tunnel wall in 3 of 7 knees corresponding to group A (Fig 8). These partial breakages caused the aforementioned short tunnels.

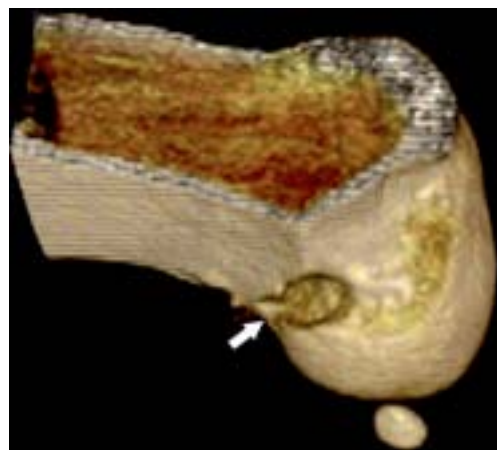
### DISCUSSION

The principal finding of this study was that placement of a single femoral tunnel at the anatomic insertion is better accomplished with the BullsEye guide rather than with offset aimers. The aforementioned finding confirms our first hypothesis.

**TABLE 2.** Tunnel Lengths Corresponding to Drilled Femoral Tunnel With Standard 5-mm Offset Aimer (Group A) and With BullsEye Guide (Group B) at 110° and 130° of Knee Flexion

|         | Minimum (mm) | Maximum (mm) | Median (mm) |
|---------|--------------|--------------|-------------|
| TL110°  |              |              |             |
| Group A | 17           | 42           | 30          |
| Group B | 27           | 40           | 34.7        |
| TL130°  |              |              |             |
| Group A | 30           | 37.2         | 35.5        |
| Group B | 26           | 42           | 32          |

Abbreviations: TL110°, tunnel length drilled at 110° of knee flexion; TL130°, tunnel length drilled at 130° of knee flexion.



**FIGURE 8.** Three-dimensional CT scan image, showing posterior tunnel wall compromise (arrow). The breach of the femoral tunnel was produced in this specimen and in 2 other specimens where the selection of the drilling site was done with the offset aimer at 110° of knee flexion.

The degree of knee flexion during drilling of the femoral tunnel is controversial. Currently, knee hyperflexion is recommended to provide increased tunnel length.<sup>18,19</sup> However, Bedi et al.<sup>10</sup> showed a paradoxical reduction in tunnel length, as well as an increased risk of posterior tunnel blowout. They suggested that this could be because of their use of a femoral offset guide when drilling through the AM portal. In contrast to our second hypothesis, no differences were observed in tunnel length when we compared 110° and 130° of knee flexion with either the standard offset aimer or the BullsEye guide in this study. However, we observed longer tunnels when using the latter guide. This might be because of posterior wall referencing with the offset aimer when drilling at a high degree of knee flexion through the AM portal. Paradoxically, this may increase the posterior trajectory of the guidewire and thereby increase the risk of short tunnels and blowout.<sup>10</sup> Three of the tunnels drilled at 110° of knee flexion with the offset aimer partially compromised the posterior walls of the tunnels. This suggests that the BullsEye guide might be safer than the 5-mm standard offset guide used at 110° of knee flexion. Furthermore, those 3 tunnels were all shorter than 25 mm, which is less than the minimum recommended tunnel length.<sup>9,10,18</sup> In the study performed by Bedi et al., this was found in an even higher proportion. They observed posterior wall compromise in

75% of the tunnels placed at 120° of knee flexion, all of which had a mean length of 21.3 mm.

Persistent rotatory instability has been shown to result in an inferior subjective functional outcome and earlier articular degeneration.<sup>20</sup> Therefore looking for a technique that could reduce this stability deficit should be mandatory. Several studies have recently shown, biomechanically, that placing the femoral tunnel through a single-bundle technique at the center of the anatomic origin of the ACL more closely restores rotational stability to the knee than does the standard tunnel reconstruction high and deep in the notch, near the so-called over-the-top position.<sup>21-23</sup> In an attempt to approach the anatomic femoral insertion of the ACL, some surgeons have suggested lowering the femoral offset aimers<sup>8-12</sup> from the high- and deep-in-the-notch position that is commonly used with the transtibial technique. This is better accomplished by drilling the tunnel through the AM portal.<sup>3-5</sup> However, to reach the anatomic center of the ACL femoral footprint, not only a lower but also a shallower tunnel is necessary.<sup>2</sup> In this study high-resolution CT with 3D reconstruction and volume-rendering software were used to evaluate the femoral tunnel placement. This technique allows for multiplanar visualization of the acquired image and the removal of tissue as needed to allow for measurements of the desired structures and their relations to each other. Purnell et al.<sup>13</sup> have recently described the ACL femoral insertion site using the same technique. They showed that, on the lateral femoral condyle, the posterior fibers of the ACL ended 3.5 mm from the proximal articular cartilage margin whereas the anteroinferior fibers did so at 3 mm to the distal cartilage margin. In the study performed by Basdekis et al.,<sup>14</sup> similar results were observed. The most posterior fibers of the ACL ended 1.6 mm from the articular margin, and the most distal fibers ended 2.2 mm from the articular margin. They also showed that for an ACL double-bundle reconstruction to be considered anatomic, it must show similar results. In this case the posterior border of the AM tunnel has to be used for referencing with the proximal cartilage margin and the anteroinferior border of the PL tunnel for the distal cartilage margin. This was also in agreement with the study performed by Girgis et al.<sup>24</sup> in 44 dissected cadaveric knees. In their study the mean distance from the posterior fibers of the ACL to the articular surface of the femoral condyle was 4 mm. In our study the single tunnel placed with the BullsEye guide showed a comparable position to all the aforementioned studies. They all showed similar distances to the prox-

imal as well to the distal cartilage margin. Conversely, when the tunnel was placed with the help of the femoral offset guide, we obtained 1 tunnel that was deeper than the anatomic footprint center. Forsythe et al.<sup>15</sup> have recently described the position of the AM and PL bundles on 3D CT reconstruction images by adapting the radiographic quadrant method described earlier.<sup>16</sup> They have shown that it has high levels of intraobserver and interobserver reliability. They observed mean deep/shallow positions of the AM and PL bundles of 21.7% and 35.1%, respectively, and mean high/low positions of the AM and PL bundles of 33.2% and 55.3%, respectively. In our study the single-tunnel placement with the offset aimer was performed at a median of 19.7% and 30.3% for the deep/shallow and high/low positions, respectively. This was very similar to the AM bundle position described in the work of Forsythe et al. On the other hand, the single-tunnel placement with the BullsEye guide was performed at a median of 26.9% and 40.8% for the deep/shallow and high/low positions, respectively. This corresponded to an intermediate position between both the AM and PL bundles. In this sense, the experimental work performed by Kato et al.,<sup>25</sup> which has shown that placing the femoral tunnel in the middle of the femoral footprint reproduces the in situ force of the normal ACL better than any other single-bundle ACL reconstruction, is interesting. For that reason and according to the specific placement results observed in our study, performing femoral tunnel placement with the BullsEye guide rather than with offset aimers might better restore the normal kinematics of the knee.

There are some limitations to this study. Some of the non-statistically significant differences observed might be because of the small sample size, which is a common limitation in cadaveric studies. We did not perform an a priori sample analysis. This may be because no differences were observed in tunnel length when comparing the 2 techniques evaluated and the 2 different degrees of knee flexion. However, comparing knees from the same cadaver theoretically minimizes size differences. Second, only the 8-mm BullsEye guide was compared with 5-mm offset aimers. Higher offset aimers could logically move the drilled tunnel closer to the anatomic site. However, we will still be using the same fixed distance from the posterior wall instead of looking for the specific anatomic center in each knee. Finally, neither interobserver nor intraobserver reliability was calculated for the measurements.

### CONCLUSIONS

Accurate placement at the center of the femoral footprint of the ACL is better accomplished with the BullsEye guide rather than with standard 5-mm offset aimers. Five-millimeter offset aimers might cause posterior tunnel blowout and present the risk of obtaining short tunnels when performing oblique femoral tunnel placement through the AM portal at 110° of knee flexion.

**Acknowledgment:** The authors appreciate Esther Moya and Ignacio Cardona for their help with the arthroscopic procedures and Manel Querol for his special contribution of preparing the specimens. They are also grateful to Sergi Mojal for assisting in the statistical analysis. Finally, they thank Eric Goode for his help in correcting the manuscript.

### REFERENCES

1. Bylski-Austrow DI, Grood E, Hefzy M, Holden JP, Butler DL. Anterior cruciate ligament replacements: A mechanical study of femoral attachment location, flexion angle at tensioning and initial tension. *J Orthop Res* 1990;8:522-532.
2. Colombet P, Robinson J, Christel P, et al. Morphology of anterior cruciate ligament attachments for anatomic reconstruction: A cadaveric dissection and radiographic study. *Arthroscopy* 2006;22:984-992.
3. Alburquerque RF, Amatuzzi MM, Pacheco AP, Angelini FJ, Campos O Jr. Positioning of the femoral tunnel for arthroscopic reconstruction of the anterior cruciate ligament: Comparative study of 2 techniques. *Clin Sao Paulo Brazil* 2007;62:613-618.
4. Arnold MP, Kooloos J, van Kampen A. Single-incision technique misses the anatomical femoral anterior cruciate ligament insertion: A cadaveric study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2001;9:194-199.
5. Gavriilidis I, Mosis EK, Pakos EE, Georgoulis AD, Mitsionis G, Xenakis TA. Transtibial versus anteromedial portal of the femoral tunnel in ACL reconstruction: A cadaveric study. *Knee* 2008;15:364-367.
6. Harner C, Honkamp N, Ranawat AS. Anteromedial portal technique for creating the anterior cruciate ligament femoral tunnel. *Arthroscopy* 2008;24:113-115.
7. Cha PS, Brucker PU, West RV, et al. Arthroscopic double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: An anatomic approach. *Arthroscopy* 2005;21:1275-1277.
8. Gelber PE, Reina F, Torres R, Pelfort X, Tey M, Monllau JC. Anatomic single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction from the anteromedial portal: Evaluation of transverse femoral fixation in a cadaveric model. *Arthroscopy* 2010;26:651-657.
9. Gelber PE, Torres R, Reina F, Monllau JC. Effect of femoral tunnel length on the safety of anterior cruciate ligament graft fixation using cross-pin technique: A cadaveric study. *Am J Sports Med* 2010;38:1877-1884.
10. Bedi A, Raphael B, Maderazo A, et al. Drilling for anterior cruciate ligament reconstruction: A cadaveric study of femoral tunnel length and obliquity. *Arthroscopy* 2010;26:342-350.
11. Sastre S, Popescu D, Núñez M, Pomes J, Tomas X, Peidro L. Double-bundle versus single-bundle ACL reconstruction using the horizontal femoral position: A prospective, randomized study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2010;18:32-36.
12. Yasuda K, Kondo E, Ichihama H, et al. Anatomic reconstruction of the anteromedial and posterolateral bundles of the anterior cruciate ligament using hamstring tendon grafts. *Arthroscopy* 2004;20:1015-1025.
13. Purnell ML, Larson AE, Clancy W. Anterior cruciate ligament insertions on the tibia and femur and their relationships to critical bony landmarks using high-resolution volume-rendering computed tomography. *Am J Sports Med* 2008;36:2083-2090.
14. Basdekis G, Christel P, Anne F. Validation of the position of the femoral tunnels in anatomic double-bundle ACL reconstruction with 3-D CT scan. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2009;17:1089-1094.
15. Forsythe B, Kopf S, Wong AK, et al. The location of femoral and tibial tunnels in anatomic anterior cruciate ligament reconstruction analyzed by three-dimensional computed tomography models. *J Bone Joint Surg Am* 2010;92:1418-1426.
16. Bernard M, Hertel P, Hornung H, Cierpinski T. Femoral insertion of the ACL. Radiographic quadrant method. *Am J Knee Surg* 1997;10:14-21; discussion, 21-22.
17. Rue JP, Ghodadra N, Bach BR Jr. Femoral tunnel placement in single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: A cadaveric study relating transtibial lateralized femoral tunnel position to the anteromedial and posterolateral bundle femoral origins of the anterior cruciate ligament. *Am J Sports Med* 2008;36:73-79.
18. Basdekis G, Abisafi C, Christel P. Influence of knee flexion angle on femoral tunnel characteristics when drilled through the anteromedial portal during anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy* 2008;4:459-464.
19. Pujol N, Thierry D, Bauer T, Hardy P. Transverse femoral fixation in anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction with hamstrings grafts: An anatomic study about the relationships between the transcondylar device and the posterolateral structures of the knee. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2006;14:724-729.
20. Jonsson H, Riklund-Ahlström K, Lind J. Positive pivot shift after ACL reconstruction predicts later osteoarthritis. 63 patients followed 5-9 years after surgery. *Acta Orthop Scand* 2004;75:594-599.
21. Loh JC, Fukuda Y, Tsuda E, Steadman RJ, Fu FH, Woo SL-Y. Knee stability and graft function following anterior cruciate ligament reconstruction: Comparison between 11 o'clock and 10 o'clock femoral tunnel placement. *Arthroscopy* 2003;3:297-304.
22. Musahl V, Plakseychuk A, VanScyoc A, et al. Varying femoral tunnels between the anatomical footprint and isometric positions. Effect on kinematics of the anterior cruciate ligament-reconstructed knee. *Am J Sports Med* 2005;5:712-718.
23. Scopp JM, Jasper LE, Belkoff SM, Moorman CT III. The effect of oblique femoral tunnel placement on rotational constraint of the knee reconstructed using patellar tendon autografts. *Arthroscopy* 2004;3:294-299.
24. Girgis FG, Marshall JL, Monajem ARS. The cruciate ligaments of the knee joint: Anatomical, functional, and experimental analysis. *Clin Orthop Relat Res* 1975:216-231.
25. Kato Y, Ingham JM, Fu FH. Effect of tunnel position for anatomic single-bundle ACL reconstruction on knee biomechanics in a porcine model. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2010;18:2-10.






# BIBLIOGRAFÍA



## 7. BIBLIOGRAFÍA

1. Bircher E. Die Arthoroendoskopie. Zentralbl Chir 1921; 48; 1460-1461.
2. Wilk RM, Richmond JC. Dacron ligament reconstruction for chronic anterior cruciate ligament insufficiency. Am J Sports Med. 1993;21:374-9.
3. Ritchey SJ. Ligamentous disruption of the knee. A review with analysis of 28 cases. US Armed Forces Med J. 1960; 11:167-76.
4. Battle WH. A case after open section of the knee-joint for irreducible traumatic dislocation. Trans Clin Soc Lond. 1900;33: 232-3.
5. Mayo Robson AW. Ruptured crucial ligaments and their repair by operation. Ann Surg. 1903;37:716-8.
6. Hey Groves EW. Operation for the repair of crucial ligaments. Lancet. 1917;190:674-5.
7. Sánchez-Alonso V, Monllau JC. The ACL-Deficient Knee. An approach based on problems resolution. Springer. 2012.
8. Petersen W, Tillman B. Structure and vascularization of the cruciate ligaments of the human knee joint. Anat Embryol (Berl). 1999 Sep; 200(3): 325-34.
9. Tena-Arregui J, Barrio-Asensio C, Viejo-Tirado F, Puerta-Fonollá J, Murillo-González J. Arthroscopic study of the knee joint in fetuses. Arthroscopy 2003 Oct; 19(8): 862-8.
10. Insall J, Scott WN. Surgery of the knee. 3rd edition. Churchill/Livingston. 2001.
11. Odensen M, Guillquist J. Functional anatomy of the anterior cruciate ligament and a rationale for reconstruction. J Bone Joint Surg Am. 1985 Feb; 67(2): 257-62.
12. Girgis FG, Marshall JL, Monajem A. The cruciate ligaments of the knee joint. Anatomical, functional and experimental analysis. Clin Orthop Relat Res 1975 Jan-Feb; (106): 216-31.
13. Morgan CD, Kalman VR, Grawl DM. Definitive landmarks for reproducible tibial tunnel placement in anterior cruciate ligament reconstruction. Arthroscopy. 1995 Jun; 11(3): 275-88.

14. Amiss AA, Dawkins GP. Functional anatomy of the anterior cruciate ligament. Fibre bundle actions related to ligament replacements and injuries. *J Bone Joint Surg Br.* 1991 Mar; 73(2): 260-7.
15. Petersen W, Zantop T. Anatomy of the anterior cruciate ligament with regard to its two bundles. *Clin Orthop Relat Res.* 2007 Jan; 454 :35-47.
16. Laprade RF, Ly TV, Wentorf FA, Engebretsen L. The posterolateral attachments of the knee: a qualitative and quantitative morphologic analysis of the fibular collateral ligament, popliteus tendon, popliteofibular ligament, and lateral gastrocnemius tendon. *Am J Sports Med.* 2003; 31; 854-860.
17. Fu F, Christel P, Miller MD, Jonson DL. Graft selection for anterior cruciate ligament reconstruction. *Instr Course Lect.* 2009; 58: 337-54.
18. Boden BP, Dean GS, Feagin JA Jr, Garret WE Jr. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. *Orthopedics* 2000; 2(6): 573-8.
19. Torg JS, Conrad W, Kalen V. Clinical diagnosis of anterior cruciate ligament instability in the athlete. *Am J Sports Med* 1976 Mar-Apr; 4(2): 84-93.
20. Liu SH, Osti L, Henri M, Bocchi L. The diagnosis of acute complete tears of the anterior cruciate ligament. Comparison of MRI, arthrometry and clinical examination. *J Bone Joint Surg Br.* 1995 Jul; 77(4): 586-8.
21. Abat F, Gelber PE, Erquicia JI, Pelfort X, Tey M, Monllau JC, Promising short-term results following selective bundle reconstruction in partial anterior cruciate ligament tears. *Knee* 2013 Oct; 20(5): 332-8.
22. Jones KG. Reconstruction of the anterior cruciate ligament. A technique using the central one-third of the patellar ligament. *J Bone Joint Surg Am.* 1963 Jul; 45: 925-32.
23. Alm A, Gillquist J. Reconstruction of the anterior cruciate ligament by using the medial third of the patellar ligament. Treatment and results. *Acta Chir Scand.* 1974; 14(4): 289-96.

- 
24. Marshall JL, Warren RF, Wickiewicz TL, Reider B. The anterior cruciate ligament: a technique of repair and reconstruction. *Clin Orthop Relat Res.* 1979 Sep; (143): 97-106.
  25. Clancy WG Jr, Nelson DA, Reider B, Narechania RG. Anterior cruciate ligament reconstruction using one-third of the patellar ligament, augmented by extra-articular tendon transfers. *J Bone Joint Surg Am.* 1982 Mar; 64(3): 352-9.
  26. Clancy WR Jr, Rarjesh GN, Rosembert TD. Anterior and posterior cruciate ligament reconstruction in rhesus monkeys. *J Bone Joint Surg Am* 1981, 63A: 1279-84.
  27. Noyes FR, Mooar PA, Matthews DS, Butler DL. The symptomatic anterior cruciate-deficient knee. Part I: the long-term functional disability in athletically active individuals. *J Bone Joint Surg Am* 1983 Feb; 65(2): 154-62.
  28. Noyes FR, Matthews DS, Mooar PA, Grood ES. The symptomatic anterior cruciate-deficient knee. Part II: The results of rehabilitation, activity modification, and counseling on functional disability. *J Bone Joint Surg Am* 1983 Feb; 65(2): 163-74.
  29. Dejour H, Deschamps G, Walsh G. Résultat du traitement des laxités antérieures chroniques par opération de Kenneth Jones- Lemaire. *Journées Lyonnaises de chirurgie du genou* 5: 129-140. 1984.
  30. Alm A, Gillquist J, Liljedahl SO. The diagnostic value of arthroscopy of the knee joint. *Injury.* 1974 May; 5(4): 319-24.
  31. Lipscomb AB, Jonhston RK, Syndner RB, Warburton MJ, Gilbert PP. Evaluation of hamstring strength following use of semitendiosus and gracilis tendons to reconstruct the anterior cruciate ligament. *Am J Sports Med,* 1982 Nov-Dec 10(6) :340-2.
  32. Ellera Gomes JL, Marcyk LR. Anterior cruciate ligament reconstruction with a loop or double thickness of semitendiosus. *Am J Sports Med.* 1984; May-Jun:199-203.
  33. Howell SM, Taylor MA. Brace-free rehabilitation, with early return to activity, for knees reconstructed with double looped semitendinosus and gracilis graft. *Arthroscopy.* 1999; 6:594-597.

34. Friedman MJ. Arthroscopic semitendinosous (gracilis) reconstruction for anterior cruciate ligament deficiency. *Techniques in Orthopaedics* 1988, 2: 74-80.
35. Deehan DJ, Cawston TE. The biology of integration of the anterior cruciate ligament. *J Bone Joint Surg Br.* 2005 Jul; 87(7): 889-95.
36. Beynon BD, Johnson RJ, Fleming BC, Kannus P, Kaplan M, Samani J, Renström P. Anterior cruciate ligament replacement: comparison of bone-patellar tendon-bone grafts with two-strand hamstring graft. A prospective, randomized study. *J Bone Joint Surg Am.* 2002 Sep; 84-A(9): 1503-13.
37. Taylor DC, DeBerardino TM, Nelson BJ, Duffey M, Tenuta J, Stoneman PD, Stoneman PD, Sturdivant RX, Mountcastle S. Patellar tendon versus hamstring tendon autografts for anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled trial using similar femoral and tibial fixation methods. *Am J Sports Med.* 2009 Oct; 37(10): 1946-57.
38. Illingworth KD, Hensler D, Working ZM, Machaleña JA, Tashman S, Fu FH. A simple evaluation of anterior cruciate ligament femoral tunnel position: the inclination angle and femoral tunnel angle. *Am J Sports Med.* 2011 Dec; 39(12): 2611-2618.
39. Goldsmith MT, Jansson KS, Smith SD, Engebretsen L, LaPrade RF, Wijdicks CA. Biomechanical comparison of anatomic single- and double-bundle anterior cruciate ligament reconstructions: an in vitro study. *Am J Sports Med* 2013 Jul; 41(7): 1595-604.
40. Tiamklang T, Sumanont S, Foocharoen T, Laopaiboon M. Double-bundle versus single-bundle reconstruction for anterior cruciate ligament rupture in adults. *Cochrane Database Syst Rev.* 2012 Nov 14;11: CD008413.
41. Kanamori A, Woo SL, Ma CB et al. The forces in the anterior cruciate ligament and knee kinematics during a simulated pivot shift test: A human cadaveric study using robotic technology. *Arthroscopy* 2000; 16: 633-639.
42. Loh JC, Fukuda Y, Tsuda E, Steadman RJ, Fu FH, Woo SL-Y. Knee stability and gait function following anterior cruciate ligament reconstruction: Comparison between 22 o'clock and 10 o'clock femoral tunnel placement. *Arthroscopy* 2003; 3: 297-304.

- 
43. Markolf KL, Park S, Jackson SR, Mc Allister DR. Anteriorposterior and rotatory stability of single and double-bundle anterior cruciate ligament reconstructions. *J Bone Joint Surg Am* 2009; 91: 107-118.
  44. Tsai AG, Wijdicks CA, Walsh MP, Laprade RF. Comparative kinematic evaluation of all-inside single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: a biomechanical study. *Am J Sports Med*. 2010 Feb; 38(2): 263-72.
  45. Ahldén M, Sernert N, Karlsson J, Kartus J. A prospective randomized study comparing double- and single bundle techniques for anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med*. 2013. Nov; 41(11): 2484-91.
  46. Bylski-Austrow DI, Grood E, Hefzy M, Holoden JP, Butler DL. Anterior cruciate ligament replacements: A mechanical study of femoral attachment location, flexion angle at tensioning and initial tension. *J Orthop Res* 1990; 8: 522-532.
  47. Markolf KL, Hame S, Monte Hunter D, et al. Effects of femoral tunnel placement on knee laxity and forces in an anterior cruciate ligament graft. *J Orthop Res* 2002; 20: 1016-1024.
  48. Giron F, Cuomo P, Aglietti P, Bull AMJ, Amis AA. Femoral attachment of the anterior cruciate ligament. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2006 Mar; 14(3): 250-256.
  49. Petersen W, Zantop T. Anatomy of the anterior cruciate ligament with regard to its two bundles. *Clin Orthop Relat Res* 2007 Jan; 454: 35-47. Review.
  50. Kopf S, Musahl V, Tashman S, Szczodri M, Shen W, Fu FH. A systematic review of the femoral origin and tibial insertion morphology of the ACL. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2009; 17: 213-219.
  51. Scopp JM, Jasper LE, Belkoff SM, Moorman CT III. The effect of oblique femoral tunnel placement on rotational constraint of the knee reconstructed using patellar tendon autografts. *Arthroscopy* 2004; 20: 294-299.
  52. Musahl V, Plakseychuk A, VanScyoc A, et al. Varying femoral tunnels between the anatomical footprint and isometric positions. Effect on kinematics of the anterior cruciate ligament-reconstructed knee. *Am J Sport Med* 2005; 33: 712-718.

53. Kopf S, Forsythe B, Wong AK, Tashman S, Irrgang JJ, Fu FH. Transtibial ACL reconstruction technique fails to position drill tunnels anatomically in vivo 3D CT study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2012 Nov; 20(11): 2200-7.
54. Kato Y, Ingham SJ, Kramer S, Smolinski P, Saito A, Fu FH. Effect of tunnel position for anatomic single-bundle ACL reconstruction on knee biomechanics in a porcine model. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2010 Jan; 18(1): 2-10.
55. Arnold MP, Kooloos J, van Kampen A. Single-incision technique misses the anatomical femoral anterior cruciate ligament insertion: A cadaveric study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2001; 9: 194-199.
56. Gavriilidis I, Motsis EK, Pakos EE, Georgoulis AD, Mitsionis G, Xenakis TA. Transtibial versus anteromedial portal of the femoral tunnel in ACL reconstruction: A cadaveric study. *Knee* 2008; 15: 364-367.
57. Harner C, Honkamp N, Ranawat AS. Anteromedial portal technique for creating the anterior cruciate ligament femoral tunnel. *Arthroscopy* 2008; 24: 113-115.
58. Harilainen A, Sandelin J. A prospective comparison of 3 hamstring ACL fixation devices—Rigidfix, BioScrew, and Intrafix— Randomized into 4 groups with 2 years of follow-up. *Am J Sport Med* 2009; 37: 699-706.
59. Clark R, Olsen RE, Larson BJ, Goble EM, Farrer RP. Crosspin femoral fixation: A new technique for hamstring anterior cruciate ligament reconstruction of the knee. *Arthroscopy* 1998; 3: 258-267.
60. McKeon BP, Gordon M, DeConciliis G, Scheller A. The safe zone for femoral cross-pin fixation. An anatomical study. *J Knee Surg* 2007; 20: 285-288.
61. Pujol N, Thierry D, Bauer T, Hardy P. Transverse femoral fixation in anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction with hamstrings grafts: An anatomic study about the relationships between the transcondylar device and the posterolateral structures of the knee. *Knee Surg Sport Traumatol Arthrosc* 2006; 14: 724-729.





62. Colombet P, Robinson J, Christel P, et al. Morphology of anterior cruciate ligament attachments for anatomic reconstruction: A cadaveric dissection and radiographic study. *Arthroscopy* 2006; 22: 984-992.
63. Rue JP, Ghodadra N, Bach BR Jr. Femoral tunnel placement in single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: A cadaveric study relating transtibial lateralized femoral tunnel position to the anteromedial and posterolateral bundle femoral origins of the anterior cruciate ligament. *Am J Sports Med* 2008; 36: 73-79.
64. Dargel J, Smith-Wiethoff R, Fisher S, Mader K, Koebke J, Schneider T. Femoral bone tunnel placement using the transtibial tunnel or the anteromedial portal in ACL reconstruction: a radiographic evaluation. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2009; 17: 220-227.
65. Bernard M, Hertel P, Hornung H, Cierpinski T. Femoral insertion of the ACL: radiographic quadrant method. *Am J Knee Surg.* 1997; 10; 14-21.
66. Baskedis G, Christel P, Anne F. Validation of the position of the femoral tunnels in anatomic double-bundle ACL reconstruction with 3-D CT scan. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2009; 17:1089-1094.
67. Forsythe B, Kopf S, Wong AK, Martins CA, Anderst W, Tashman S, Fu FH. The location of femoral and tibial tunnels in anatomic double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction analyzed by three-dimensional computed tomography models. *J Bone Joint Surg Am.* 2010 Jun; 92(6): 1418-26.
68. Gelber PE, Torres R, Reina F, Monllau JC. Effect of femoral tunnel length on the safety of anterior cruciate ligament reconstruction from the anteromedial portal: Evaluation of transverse femoral fixation in a cadaveric model. *Am J Sports Med* 2010; 38:1877-1884.
69. Bedi A, Raphael B, Maderazo. Drilling for anterior cruciate ligament reconstruction: A cadaveric study of femoral tunnel length and obliquity. *Arthroscopy* 2010; 26: 342-350.
70. Basdekis G, Abisafi C, Christel P. Influence of knee flexion angle on femoral tunnel characteristics when drilled through the anteromedial portal during anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy* 2008;4:459-464.

- 71.** Hantes M, Dailiana Z, Zachos V, Varitimidis S. Anterior cruciate ligament reconstruction using the Bio-Transfix femoral fixation device and anteromedial portal technique. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2006;14: 497- 501.
- 72.** Fu FH. The clock-face reference: Simple but nonanatomic. *Arthroscopy* 2008; 24:1433.
- 73.** Nishimoto K, Kuroda R, Mizuno K, et al. Analysis of the graft bending angle at the femoral tunnel aperture in anatomic double bundle anterior cruciate ligament reconstruction: A comparison of the transtibial and the far anteromedial portal technique. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2009; 17: 270-276.
- 74.** Golish SR, Baumfeld JA, Schoderbek RJ, Miller MD. The effect of femoral tunnel starting position on tunnel length in anterior cruciate ligament reconstruction: a cadaveric study. *Arthroscopy*. 2007 Nov; 23(11): 1187-92.
- 75.** Castoldi F, Bonasia DE, Marvotti A, Dettoni F, Rossi R. ACL reconstruction using the Rigidfix femoral fixation device via the anteromedial portal: a cadáver study to evaluate chondral injuries. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2008 Mar, 16(3): 275-8

